24ª EDIÇÃO

FRANCISCO GABRIEL CAPUANO
MARIA APARECIDA MENDES MARINO

ELETRÔNICA 1
TN1J2

LABORATÓRIO
DE ELETRICIDADE E ELETRÔNICA

TEORIA E
PRÁTICA

ÉRICA

Laboratório de Eletricidade e Eletrônica

CÓPIA NÃO AUTORIZADA É CRIME
ABDR
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DIREITOS REPROGRÁFICOS
RESPEITE O DIREITO AUTORAL

EDITORA AFILIADA

GABRIEL S. CORREIA

2010

Seja Nosso Parceiro no Combate à Cópia Ilegal

A cópia ilegal é crime. Ao efetuá-la, o infrator estará cometendo um grave erro, que é inibir a produção de obras literárias, prejudicando profissionais que serão atingidos pelo crime praticado.

Junte-se a nós nesta corrente contra a pirataria. Diga não à cópia ilegal.

Seu Cadastro É Muito Importante para Nós

Se você não comprou o livro pela Internet, ao preencher e remeter a ficha de cadastro constante no final desta publicação, você passará a receber informações sobre nossos lançamentos em sua área de preferência.

Conhecendo melhor nossos leitores e suas preferências, vamos produzir títulos que atendam suas necessidades.

Obrigado pela sua escolha.

Fale Conosco!

Eventuais problemas referentes ao conteúdo deste livro serão encaminhados ao(s) respectivo(s) autor(es) para esclarecimento, excetuando-se as dúvidas que dizem respeito a pacotes de softwares, as quais sugerimos que sejam encaminhadas aos distribuidores e revendedores desses produtos, que estão habilitados a prestar todos os esclarecimentos.

Os problemas só podem ser enviados por:

1. E-mail: producao@erica.com.br
2. Fax: (11) 2097.4060
3. Carta: Rua São Gil, 159 - Tatuapé - CEP 03401-030 - São Paulo - SP

Francisco Gabriel Capuano
Maria Aparecida Mendes Marino

Laboratório de Eletricidade e Eletrônica

24ª Edição

4ª Reimpressão

São Paulo
2010 - Editora Érica Ltda.

GABRIEL S. CORREIA

Índice Analítico

Experiência 1 - Resistores e Códigos de Cores 9
Experiência 2 - Ohmímetro 15
Experiência 3 - Voltímetro 19
Experiência 4 - Amperímetro 23
Experiência 5 - Lei de Ohm 27
Experiência 6 - Potência Elétrica 31
Experiência 7 - Circuito Série e Circuito Paralelo de Resistores 35
Experiência 8 - Circuito Série-Paralelo 43
Experiência 9 - Potenciômetro 47
Experiência 10 - Divisor de Tensão 51
Experiência 11 - Geradores Elétricos 57
Experiência 12 - Máxima Transferência de Potência 63
Experiência 13 - Leis de Kirchhoff 69
Experiência 14 - Teorema de Thévenin 75
Experiência 15 - Teorema de Norton 81
Experiência 16 - Teorema da Superposição 87
Experiência 17 - Ponte de Wheatstone 91
Experiência 18 - Bipolos Não Ôhmicos 97
Experiência 19 - Resistência Interna de um Galvanômetro 101
Experiência 20 - Resistência Shunt em Amperímetro 105
Experiência 21 - Resistência Multiplicadora em Voltímetro 109
Experiência 22 - Ohmímetro Série 113
Experiência 23 - Ohmímetro Paralelo 119
Experiência 24 - Osciloscópio 125
Experiência 25 - Medida de Tensão e de Frequência com o Osciloscópio 131
Experiência 26 - Figuras de Lissajous e Medidas de Defasagem 141
Experiência 27 - Capacitor em Regime DC 147

GABRIEL S. CORREIA 2014

Experiência 28 - Indutor em Regime DC 157
Experiência 29 - Capacitor em Regime AC 165
Experiência 30 - Indutor em Regime AC 169
Experiência 31 - Circuito RC-Série 173
Experiência 32 - Circuito RL-Série 179
Experiência 33 - Circuito RLC-Série 183
Experiência 34 - Circuito RC-Paralelo 193
Experiência 35 - Circuito RL-Paralelo 197
Experiência 36 - Circuito RLC-Paralelo 201
Experiência 37 - Filtros Passa-Baixa e Passa-Alta 205
Experiência 38 - Transformador 211
Experiência 39 - Diodo 219
Experiência 40 - Retificação e Filtragem Capacitiva 227
Experiência 41 - Diodo Zener 235
Experiência 42 - Estabilização 239
Experiência 43 - Circuitos Ceifadores 245
Experiência 44 - Circuitos Grampeadores 251
Experiência 45 - Multiplicadores de Tensão 257
Experiência 46 - Transistor 261
Experiência 47 - Polarização de Transistores 271
Experiência 48 - Transistor como Chave 281
Experiência 49 - Amplificador de Pequenos Sinais 287
Experiência 50 - Conexão Darlington 291
Experiência 51 - Fonte de Tensão Estabilizada 297
Experiência 52 - Fonte de Corrente Estabilizada 303

Este livro visa atender aos laboratórios de eletricidade e eletrônica básica dos cursos técnicos, profissionalizantes, bem como dos cursos superiores, dando suporte teórico e prático aos principais conceitos nos campos da eletricidade e eletrônica básica.

No desenrolar dos assuntos abrange a parte tecnológica, ou seja, construtiva de determinados componentes de destaque, mais usuais, familiarizando o leitor com eles, possibilitando melhor aproveitamento na vida prática.

Para o desenvolvimento teórico da habilidade de leitura dos instrumentos de medida, utilizamos modelos nos padrões mais comuns, sem nos preocuparmos com os aspectos específicos definidos por cada tipo, sendo esta atividade melhor compreendida e complementada na parte prática.

Foi também nossa preocupação utilizar nos exercícios de projeto valores comerciais dos componentes, conforme dimensionamento real, supondo uma possível montagem. As experiências foram dimensionadas de tal forma a se adaptarem com facilidade aos laboratórios já existentes, empregando componentes e equipamentos com pouca sofisticação, facilmente encontrados.

Esperamos, com isso, cumprir os objetivos propostos, proporcionando conhecimentos suficientes para um bom desenvolvimento do leitor nessa área.

Os autores

EXPERIÊNCIA

1

Resistores e Códigos de Cores

Objetivos

- Ler o valor nominal de cada resistor por meio do código de cores.
- Determinar a máxima potência dissipada pelo resistor por meio de suas dimensões físicas.

Teoria

Resistores são componentes que têm por finalidade oferecer uma oposição à passagem de corrente elétrica por meio de seu material. A essa oposição damos o nome de resistência elétrica, que possui como unidade o ohm [Ω], onde encontramos como múltiplos mais usuais:

- Quilo-ohm (KΩ) → $1K\Omega = 10^3\ \Omega$
- Megaohm (MΩ) → $1M\Omega = 10^6\ \Omega$

Classificamos os resistores em dois tipos, sendo fixos e variáveis. Os resistores fixos são aqueles cujo valor da resistência não pode ser alterado, enquanto os variáveis têm a sua resistência modificada dentro de uma faixa de valores por meio de um cursor móvel.

Os resistores fixos são comumente especificados por três parâmetros: o valor nominal da resistência elétrica, a tolerância, ou seja, a máxima variação em porcentagem do valor nominal, e a máxima potência elétrica dissipada.

Exemplo

Tomemos um resistor de $100\Omega \pm 5\%$ - 0,33W. Isso significa que possui um valor nominal de 100Ω, uma tolerância sobre esse valor de mais ou menos 5% e pode dissipar uma potência de no máximo 0,33 watts.

Observação: *Abordamos potência elétrica na experiência 6.*

Dentre os tipos de resistores fixos destacamos os de fio, de filme de carbono e de filme metálico.

Resistor de Fio

Consiste basicamente em um tubo cerâmico que serve de suporte para enrolarmos um determinado comprimento de fio, de liga especial, para obter o valor de resistência desejado. Os terminais desse fio são conectados às braçadeiras presas ao tubo. Além deste, existem outros tipos construtivos esquematizados, conforme mostra a Figura 1.1.

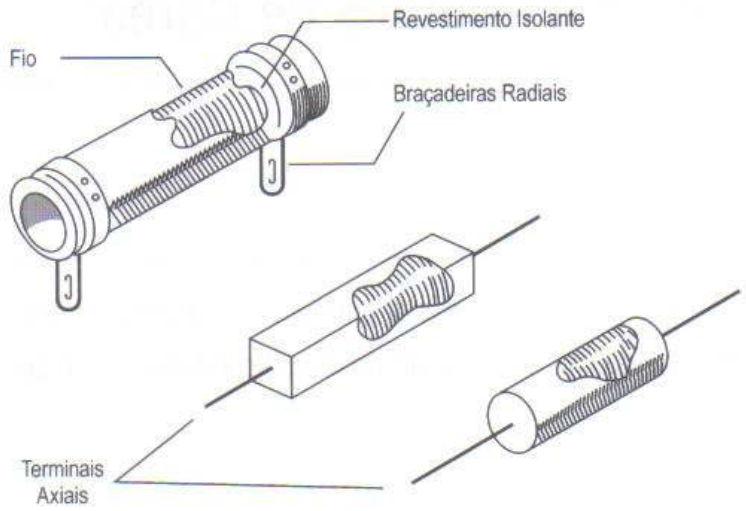


Figura 1.1 - Resistores de fio.

Os resistores de fio são encontrados com valores de resistência de alguns ohms até alguns quilo-ohms, e são aplicados onde se exigem altos valores de potência, acima de 5W, sendo suas especificações impressas no próprio corpo.

Resistor de Filme de Carbono

Consiste em um cilindro de porcelana recoberto por um filme (película) de carbono. O valor da resistência é obtido mediante a formação de um sulco, transformando a película em uma fita helicoidal. Esse valor pode variar conforme a espessura do filme ou a largura da fita. Como revestimento, encontramos uma resina protetora sobre a qual é impresso um código de cores, identificando seu valor nominal e tolerância.

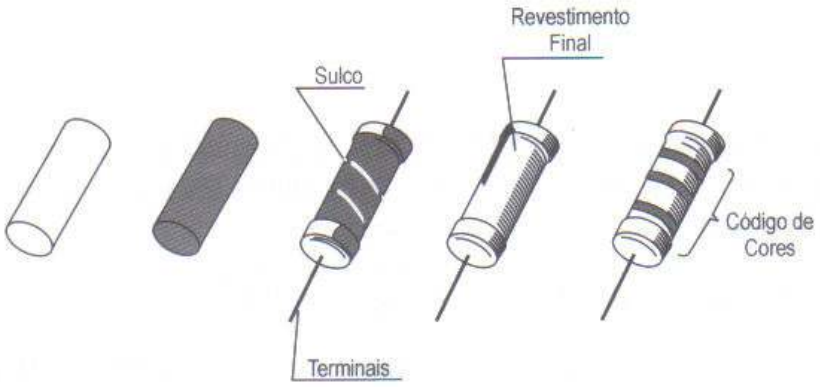


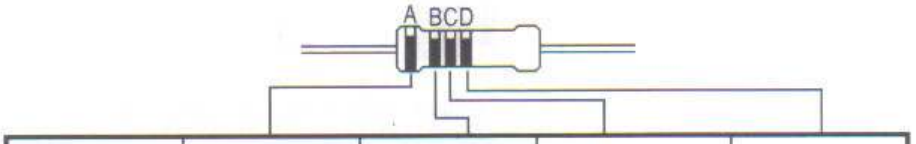
Figura 1.2 - Resistor de filme de carbono.

Os resistores de filme de carbono são destinados ao uso geral e suas dimensões físicas determinam a máxima potência que eles podem dissipar.

Resistor de Filme Metálico

Sua estrutura é idêntica à de filme de carbono, somente que se utiliza uma liga metálica (níquel-cromo) para formar a película, obtendo valores mais precisos de resistência, com tolerâncias de 1% e 2%.

O código de cores utilizado nos resistores de película é visto na Figura 1.3.



Cor	1º algarismo	2º algarismo	Fator multiplicador	Tolerância
Preto	-	0	x 1	-
Marrom	1	1	x 10	± 1%
Vermelho	2	2	x 10^2	± 2%
Laranja	3	3	x 10^3	–
Amarelo	4	4	x 10^4	–
Verde	5	5	x 10^5	–
Azul	6	6	x 10^6	–
Violeta	7	7	-	–
Cinza	8	8	-	–
Branco	9	9	-	–
Ouro	-	-	x 10^{-1}	± 5%
Prata	-	-	x 10^{-2}	± 10%

Figura 1.3 - Código de cores.

Observações: *A ausência da faixa de tolerância indica que esta é de ± 20%.*

Para os resistores de precisão encontramos cinco faixas. As três primeiras representam o primeiro, segundo e o terceiro algarismos significativos e as demais, respectivamente, fator multiplicativo e tolerância.

A Figura 1.4 mostra a especificação de potência com dimensões em tamanho real.

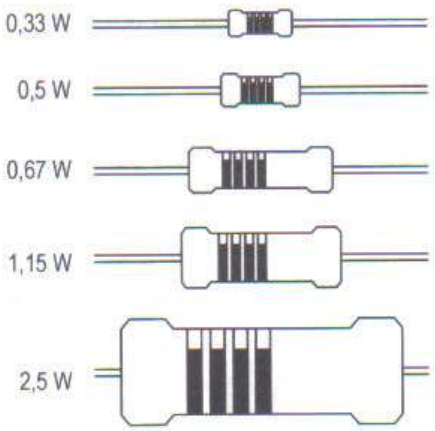


Figura 1.4 - Resistores de película de carbono em tamanho real.

Valores padronizados para resistores de película:

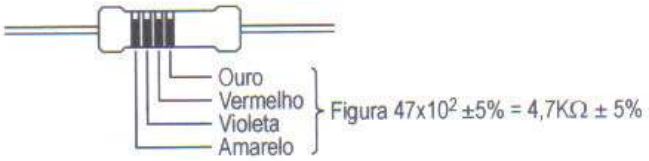
1 - Série: 5%, 10% e 20% de tolerância							
10	12	15	18	22	27	33	39
47	56	68	82				

2 - Série: 2% e 5% de tolerância							
10	11	12	13	15	16	18	20
22	24	27	30	33	36	39	43
47	51	56	62	68	75	82	91

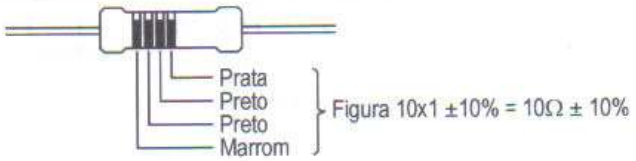
3 - Série: 1% de tolerância							
100	102	105	107	110	113	115	118
121	124	127	130	133	137	140	143
147	150	154	158	162	165	169	174
178	182	187	191	196	200	205	210
215	221	226	232	237	243	249	255
261	267	274	280	287	294	301	309
316	324	332	340	348	357	365	374
383	392	402	412	422	432	442	453
464	475	487	499	511	523	536	549
562	576	590	604	619	634	649	665
681	698	715	732	750	768	787	806
825	845	866	887	909	931	953	976

A seguir, mostramos alguns exemplos de leitura, utilizando o código de cores:

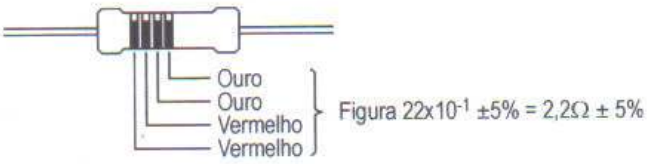
Exemplo 1



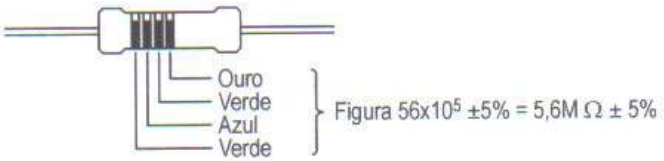
Exemplo 2



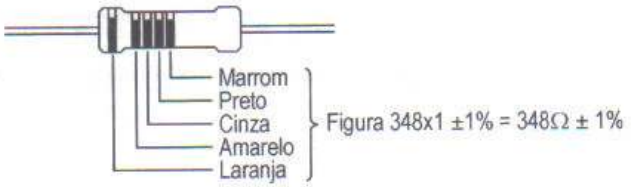
Exemplo 3



Exemplo 4



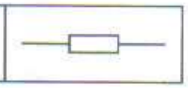
Exemplo 5



Material Experimental

- Dez resistores de valores diversos.

Simbologia

Resistor	

Parte Prática

1) Faça a leitura de cada resistor e anote no Quadro 1.1 o valor nominal, a tolerância e a potência.

Resitor	Valor nominal	Tolerância	Potência (W)
R_1			
R_2			
R_3			
R_4			
R_5			
R_6			
R_7			
R_8			
R_9			
R_{10}			

Quadro 1.1

Exercícios

1) Determine a sequência de cores para os resistores seguintes:

   a) 10KΩ ± 5%
   b) 390KΩ ± 10%
   c) 5,6Ω ± 2%
   d) 715Ω ± 1%
   e) 0,82Ω ± 2%

2) O que determina o valor ôhmico em um resistor de filme de carbono?

3) Qual é o parâmetro definido por meio das dimensões físicas de um resistor?

4) Cite um exemplo de aplicação que você conhece dos resistores de fio.

EXPERIÊNCIA

2

Ohmímetro

Objetivos

- Utilizar o ohmímetro para medidas de resistência elétrica.
- Familiarizar-se com as escalas do instrumento.

Teoria

O ohmímetro é um instrumento utilizado para medir resistência elétrica. Juntamente com o voltímetro e o amperímetro, ele faz parte do aparelho de medidas denominado multímetro ou multiteste.

Apresentamos, na Figura 2.1, a configuração de um modelo padrão, que será utilizado no desenvolvimento teórico da habilidade de leitura de suas escalas.

Observe a Figura 2.1. Sua escala apresenta uma característica logarítmica, fato a ser abordado na experiência referente ao ohmímetro série, juntamente com sua estrutura interna. Na chave seletora encontramos as posições x1, x10, x100 e x1K, as quais, respectivamente, multiplicam o valor impresso na escala por 1, 10, 100, 1000, obtendo o resultado em ohms (Ω).

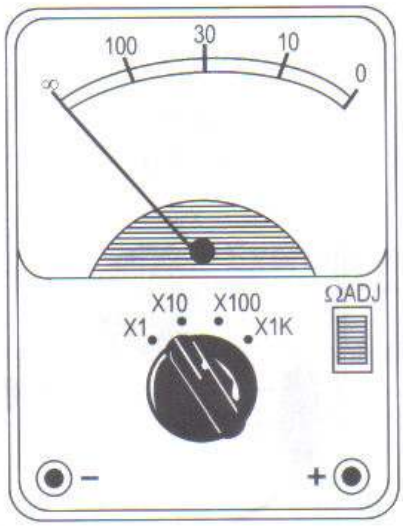


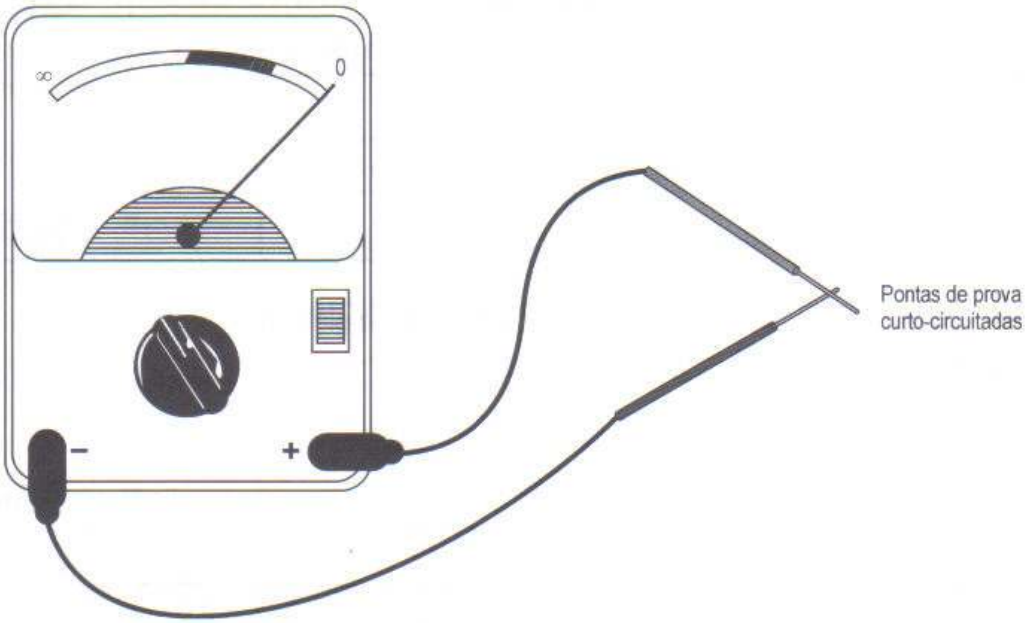
Figura 2.1 - Ohmímetro padrão.

Para efetuar uma medida, devemos fazer o ajuste de zero. Para tanto, curto-circuitamos as suas pontas de prova deflexionando o ponteiro até a região próxima ao zero da escala de ohms. A seguir, movimenta-se o controle de ajuste (ΩADJ) até o ponteiro coincidir com o traço referente ao zero. Esse ajuste deve ser repetido toda vez que mudamos a posição da chave seletora, sendo também responsável pela precisão da medida.

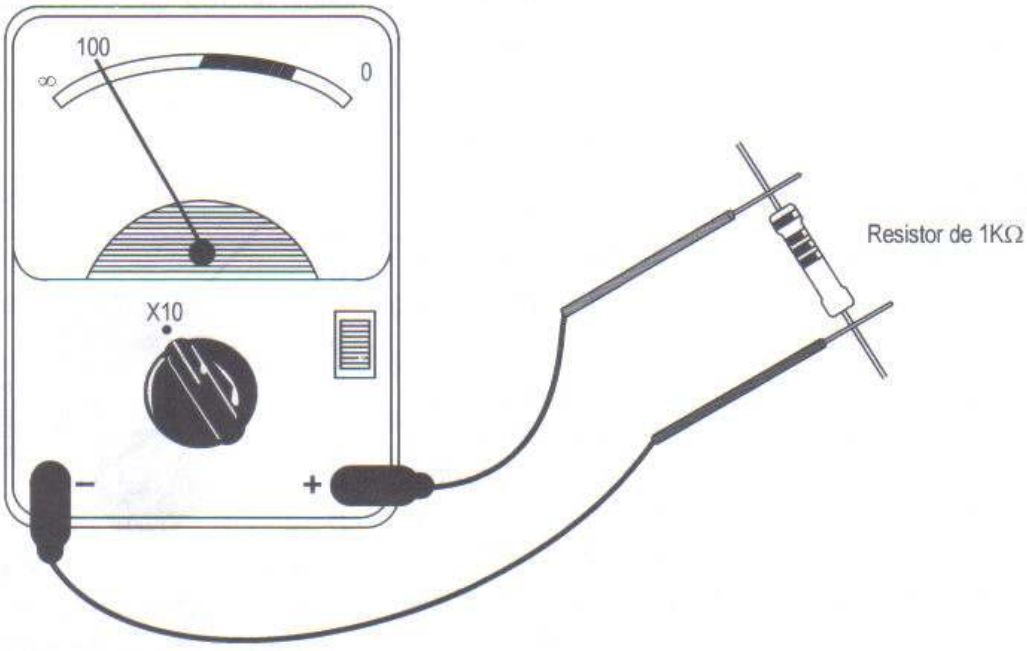
Feito o ajuste, colocamos as pontas de prova em contato com os terminais do componente a ser medido, observando que devemos escolher uma posição para a chave seletora, de maneira a ter uma leitura em região da escala com boa definição.

A seguir, vamos exemplificar a utilização do ohmímetro:

1) Ajuste de zero.



2) Medida de uma resistência.



- Multímetro.
- Resistores: 4,7Ω, 56Ω, 330Ω, 2,2KΩ, 8,2KΩ, 18KΩ, 68KΩ, 270KΩ, 390KΩ e 1,2MΩ.

Parte Prática

1) Meça cada resistor e anote os valores no Quadro 2.1. Em cada medida, coloque a chave seletora em todas as posições, escolhendo uma de melhor conveniência para leitura, não se esquecendo de ajustar o zero.

2) Leia e anote para cada resistor sua tolerância.

Valor nominal (Vn)	Tolerância	Valor medido (Vm)	Posição da escala	Δ R%
4,7Ω				
56Ω				
330Ω				
2,2KΩ				
8,2KΩ				
18KΩ				
68KΩ				
270KΩ				
390KΩ				
1,2MΩ				

Quadro 2.1

Exercícios

1) Compare os valores medidos com os valores nominais. Calcule o desvio percentual e anote no Quadro 2.1.

$$\Delta R\% = \frac{|Vn - Vm|}{Vn} \cdot 100$$

2) Compare ΔR% com a tolerância do resistor e tire conclusões.

Anotações

EXPERIÊNCIA

3

Voltímetro

Objetivos

- Utilizar o voltímetro para medidas de tensão contínua.
- Familiarizar-se com o instrumento e suas escalas.

Teoria

Tensão é a diferença de energia potencial elétrica entre dois pontos, sendo sua unidade o volt (V). Temos dois tipos de tensão, contínua e alternada, que representamos, respectivamente, por V_{DC} e V_{AC}. Este capítulo estuda apenas tensão contínua.

A tensão contínua é aquela que não muda de polaridade com o tempo, isto é, apresenta um polo sempre positivo e outro sempre negativo. Como exemplo, tomemos uma pilha comum que entre seus polos apresenta uma tensão (diferença de potencial) de 1,5V.

O voltímetro ideal é aquele que possui resistência interna infinita [∞] não interferindo no circuito, quando conectado em paralelo com os pontos entre os quais se deseja medir a tensão. Na prática, porém, possui resistência interna cujo valor varia conforme sua estrutura.

Apresentamos na Figura 3.1 a configuração de um voltímetro padrão.

O voltímetro apresenta uma escala linear e o modelo possui como fundo de escala os valores 30, 12 e 6, sendo as posições da chave seletora múltiplas destes valores, possibilitando a medida em outras faixas.

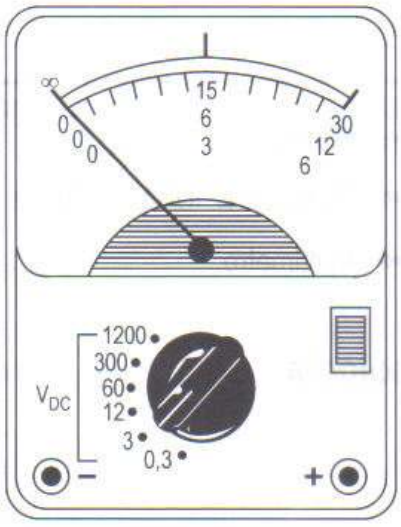


Figura 3.1 - Voltímetro padrão.

Com a chave seletora na posição 3V, podemos ler tensões de 0 a 3V, utilizando como fundo de escala o valor 30 e dividindo a leitura por 10. Para melhor entendimento, esquematizamos na Figura 3.2 a medida da tensão de uma pilha.

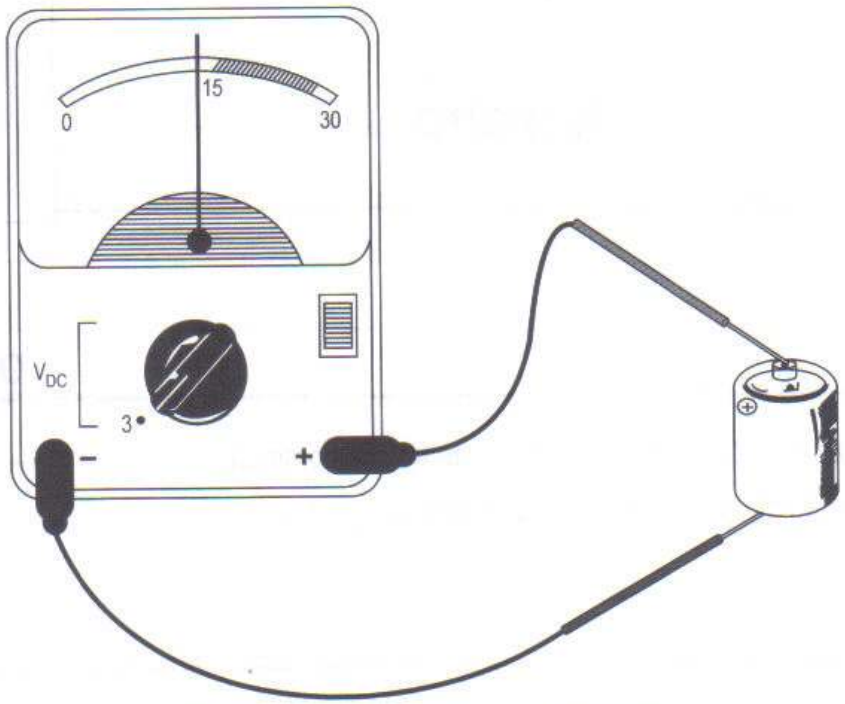


Figura 3.2 - Medida da tensão de uma pilha.

Observando a Figura 3.2, notamos que a tensão medida é 1,5V. Para medir uma tensão desconhecida, devemos posicionar a chave seletora em um valor alto e ir diminuindo até encontrar uma escala conveniente para a leitura, não se esquecendo de observar a polaridade correta.

Material Experimental

- Pilhas: 1,5V (quatro).
- Resistores: 47Ω , 100Ω e 330Ω.
- Multímetro.

Simbologia

Voltímetro DC	
Pilha	

Parte Prática

1) Meça a tensão de cada pilha e anote o valor no Quadro 3.1. Anote também a posição da chave seletora, utilizada na leitura.

	Valor medido	Posição da chave seletora
pilha 1		
pilha 2		
pilha 3		
pilha 4		

Quadro 3.1

2) Associe as pilhas, conforme a Figura 3.3, e meça a tensão entre os pontos A e B, anotando os resultados no Quadro 3.2.

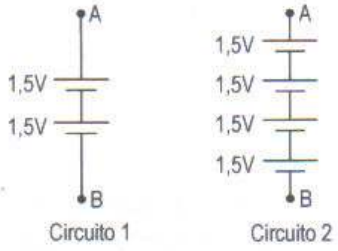


Figura 3.3

	V_{AB} medido	Posição da chave seletora
circuito 1		
circuito 2		

Quadro 3.2

3) Monte o circuito da Figura 3.4, meça e anote as tensões entre os pontos, conforme o Quadro 3.3.

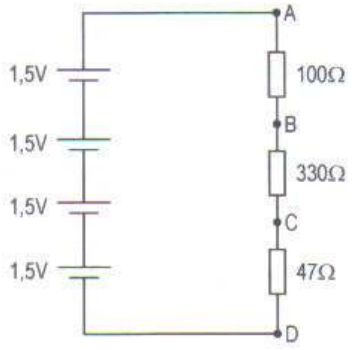


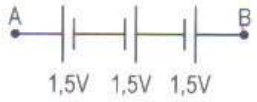
Figura 3.4

Valores de tensão	Valor medido	Posição da chave seletora
V_{AB}		
V_{BC}		
V_{CD}		
V_{AD}		

Quadro 3.3

Exercícios

1) Determine como deve ser posicionado um voltímetro para medir a tensão resultante entre A e B. Dê o valor da leitura e a escala utilizada.



2) Ao medirmos a tensão de uma bateria de automóvel com um voltímetro, com a chave seletora na posição 1200V, ele apresenta um valor próximo a zero. Por quê?

EXPERIÊNCIA

4

Amperímetro

Objetivos

- Utilizar o amperímetro para medidas de corrente contínua.
- Familiarizar-se com o instrumento e suas escalas.

Teoria

Corrente elétrica é o movimento ordenado de elétrons em um meio condutor, sendo sua unidade ampère [A], tendo como submúltiplos:

- miliampère (mA) $\rightarrow$ $1mA = 10^{-3}A$
- microampère (μA) $\rightarrow$ $1\mu A = 10^{-6}A$
- nanoampère (nA) $\rightarrow$ $1nA = 10^{-9}A$

Há dois tipos de corrente, contínua e alternada, conforme características na sua geração. Nesta experiência estudaremos a corrente contínua, que é resultante da aplicação de uma tensão contínua em uma carga resistiva.

O amperímetro é o instrumento utilizado para medidas de corrente e que também faz parte do multímetro.

Para efetuarmos uma medida de corrente, ela deve circular pelo instrumento. Para tanto é preciso interromper o circuito e intercalar o amperímetro, observando a polaridade correta.

O amperímetro ideal é aquele que possui resistência interna nula, não influindo no circuito a ser medido. Na prática, possui resistência interna de baixo valor, conforme características de sua estrutura.

Apresentamos na Figura 4.1 a configuração de um amperímetro padrão.

Figura 4.1 - Amperímetro padrão.

O amperímetro apresenta uma escala linear e neste modelo temos como fundo de escala os valores 30, 12 e 6, os mesmos utilizados pelo voltímetro, pois o multímetro possui escalas comuns aos dois instrumentos.

Para medir a corrente elétrica no circuito da Figura 4.2, interrompemos o circuito no ponto desejado a intercalamos o medidor.

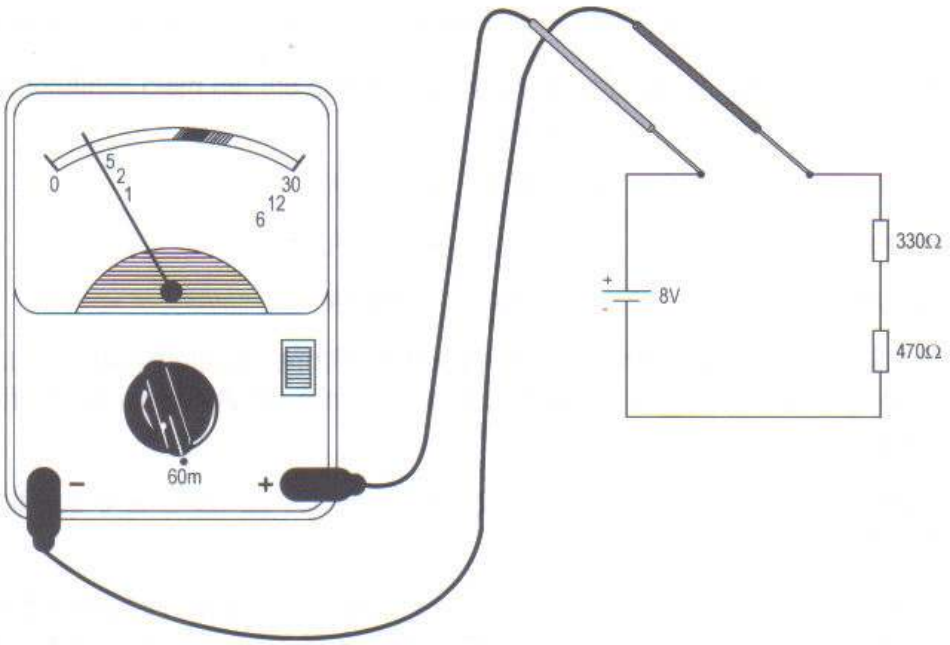


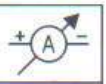
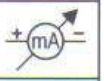
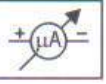
Figura 4.2 - Medida de corrente.

Conforme mostra a Figura 4.2, a corrente medida é 10mA. Convém observar que após efetuada a medida, retiramos o instrumento e tornamos a conectar os pontos abertos no circuito.

Para efetuar uma medida cujo valor é desconhecido, devemos, por medida de precaução, colocar a chave seletora numa posição de fundo de escala de alto valor e ir diminuindo até atingir uma escala apropriada.

- Pilhas: 1,5V (duas).
- Resistores: 220Ω, 680Ω e 1KΩ.
- Multímetro.

Simbologia

Amperímetro	
Miliamperímetro	
Microamperímetro	

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 4.3, meça e anote as correntes nos pontos indicados, Quadro 4.1. Anote a posição da chave seletora.

Atenção: *A polaridade correta da colocação do instrumento segue a das pilhas.*

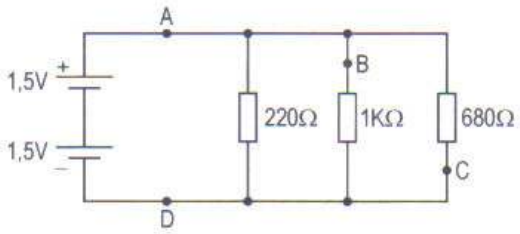


Figura 4.3

	Valor medido	Posição da chave seletora
ponto A		
ponto B		
ponto C		
ponto D		

Quadro 4.1

1) Indique no esquema da Figura 4.4 a polaridade correta de cada medidor.

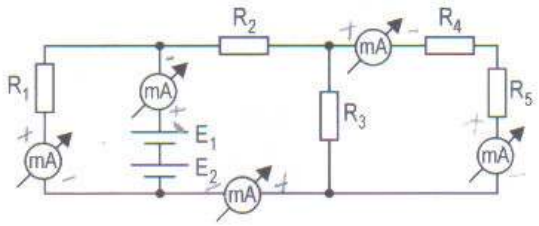


Figura 4.4

2) Assinale no esquema da Figura 4.5 onde devemos interromper para medir a corrente que passa pelo conjunto R_3 e R_4.

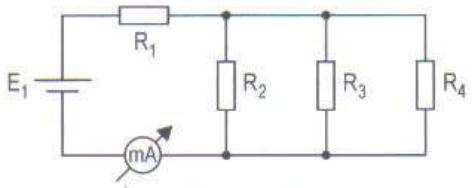


Figura 4.5

3) De quais resistores o miliamperímetro esquematizado no circuito da Figura 4.5 mede a corrente?

EXPERIÊNCIA

5

Lei de Ohm

Objetivos

- Verificar a lei de Ohm.
- Determinar a resistência elétrica através dos valores de tensão e corrente.

Teoria

No século passado, Georg Ohm enunciou: "Em um bipolo ôhmico, a tensão aplicada aos seus terminais é diretamente proporcional à intensidade de corrente que o atravessa". Assim sendo, podemos escrever:

$$V = R \cdot I$$

em que: V - tensão aplicada (V)

R - resistência elétrica (Ω)

I - intensidade de corrente (A)

Levantando, experimentalmente, a curva da tensão em função da corrente para um bipolo ôhmico, teremos uma característica linear, conforme mostra a Figura 5.1.

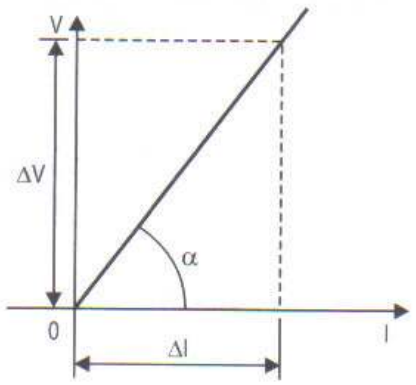


Figura 5.1 - Curva característica de um bipolo ôhmico.

Da característica temos $tg\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta I}$, de que concluímos que a tangente do ângulo α representa a resistência elétrica do bipolo, portanto podemos escrever que $tg\alpha = R$.

Notamos que o bipolo ôhmico é aquele que segue essa característica linear, e qualquer outra não linear corresponde a um bipolo não ôhmico.

Para levantar a curva característica de um bipolo, precisamos medir a intensidade de corrente que o percorre e a tensão aplicada aos seus terminais. Para isso montamos o circuito da Figura 5.2, em que utilizamos como bipolo o resistor de 100Ω.

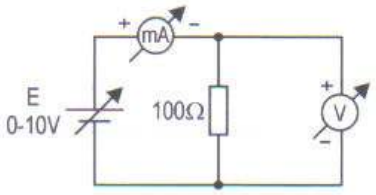


Figura 5.2 - Circuito para levantamento da curva de um bipolo.

O circuito consiste em uma fonte variável, alimentando o resistor. Para cada valor de tensão ajustado temos um respectivo valor de corrente, e colocados numa tabela, possibilitam o levantamento da curva, conforme mostra a Figura 5.3.

V(V)	I(mA)
0	0
2	20
4	40
6	60
8	80
10	100

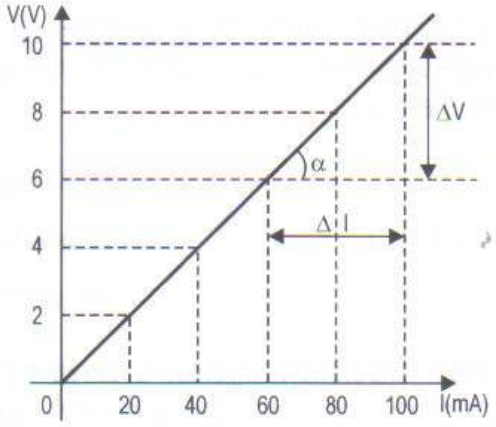


Figura 5.3 - Tabela e curva característica do bipolo ôhmico.

Da curva temos:

$$tg\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{10-6}{(100-60)\cdot 10^{-3}} = 100\Omega$$

- Fonte variável (faixa utilizada: 0 - 12V).
- Resistores: 470Ω, 1KΩ, 2,2KΩ e 3,9KΩ.
- Multímetro.

Simbologia

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 5.4.

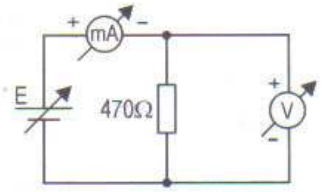


Figura 5.4

2) Varie a tensão da fonte conforme o Quadro 5.1. Para cada valor de tensão ajustada, meça e anote o valor da corrente.

	R = 470Ω	R = 1KΩ	R = 2,2KΩ	R = 3,9KΩ
E (V)	I (mA)	I (mA)	I (mA)	I (mA)
0				
2				
4				
6				
8				
10				
12				

Quadro 5.1

3) Repita os itens 1 e 2 para os outros valores de resistência, anotados no Quadro 5.1.

1) Com os valores obtidos, levante o gráfico V = f(I) para cada resistor.

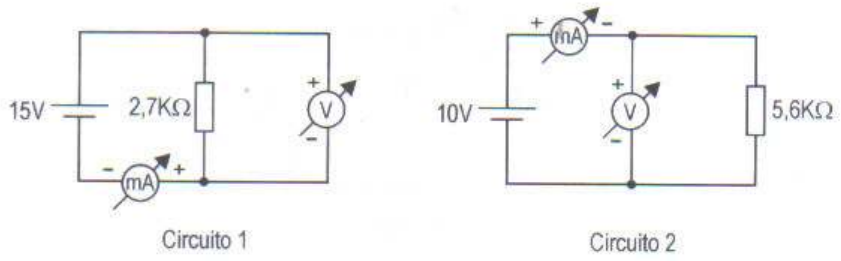
2) Determine, por meio do gráfico, o valor de cada resistência, preenchendo o Quadro 5.2.

Valor nominal	Valor determinado
470Ω	
1KΩ	
2,2KΩ	
3,9KΩ	

Quadro 5.2

3) Explique as discrepâncias dos valores nominais.

4) Nos circuitos da Figura 5.5, calcule o valor lido pelos instrumentos.



Circuito 1 Circuito 2

Figura 5.5

5) Determine o valor de resistência elétrica que, quando submetida a uma tensão de 5V, é percorrida por uma corrente de 200mA.

EXPERIÊNCIA

6

Potência Elétrica

Objetivos

- Levantar a curva da potência em função da corrente de um resistor.
- Observar o efeito Joule.

Teoria

Aplicando uma tensão aos terminais de um resistor, estabelecer-se-á uma corrente que é o movimento de cargas elétricas por meio deste. O trabalho realizado pelas cargas elétricas, em um determinado intervalo de tempo, gera uma energia que é transformada em calor por **efeito Joule** e é definida como **potência elétrica**. Numericamente, a potência elétrica é igual ao produto da tensão e da corrente, resultando em uma grandeza cuja unidade é o watt (W). Assim sendo, podemos escrever:

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta t} = P = V \cdot I$$

em que: $\Delta\tau$ representa a variação de trabalho.

Δt é o intervalo de tempo.

P é a potência elétrica.

Como múltiplos da unidade de potência encontramos:

- Quilowatt (KW) $\rightarrow$ $1KW = 10^3W$
- Megawatt (MW) $\rightarrow$ $1MW = 10^6W$

e como submúltiplo mais usual:

- Miliwatt (mW) $\rightarrow$ $1mW = 10^{-3}W$

Utilizando a definição da potência elétrica juntamente com a lei de Ohm, obtemos outras relações usuais:

$$P = V \cdot I \quad e \quad V = R \cdot I$$

Substituindo, temos:

$$P = R \cdot I \cdot I \qquad \therefore \qquad P = R \cdot I^2$$

Analogamente:

$$I = \frac{V}{R} \rightarrow P = V \cdot \frac{V}{R} \qquad \therefore \qquad P = \frac{V^2}{R}$$

O efeito térmico, produzido pela geração de potência, é aproveitado por inúmeros dispositivos, tais como chuveiro elétrico, secador, ferro elétrico, soldador etc. Esses dispositivos são constituídos basicamente por resistências, que alimentadas por tensões e, consequentemente, percorridas por correntes elétricas transformam energia elétrica em térmica.

Material Experimental

- Fonte variável (faixa utilizada: 0 - 10V).
- Resistores: 100 Ω/1,15W e 100 Ω/5W.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 6.1.

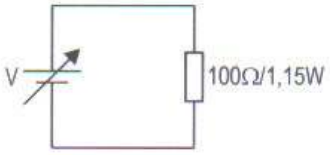


Figura 6.1

2) Varie a tensão da fonte de acordo com o Quadro 6.1. Meça e anote as respectivas correntes.

V (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I (mA)											
P (mW)											

Quadro 6.1

3) Troque o resistor por 100 Ω/5W. Repita o item 2, preenchendo o Quadro 6.2.

V (V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I (mA)											
P (mW)											

Quadro 6.2

4) Monte o circuito da Figura 6.2.

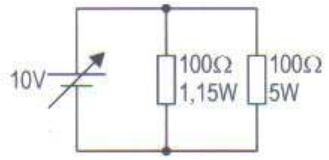


Figura 6.2

5) Meça a tensão e a corrente em cada resistor, anotando no Quadro 6.3.

R(Ω)	V(V)	I(mA)	P(W)
100/1,15W			
100/5W			

Quadro 6.3

6) Verifique o aquecimento dos dois resistores. Anote o que você observou.

Exercícios

1) Calcule as potências dissipadas pelos resistores, preenchendo os Quadros 6.1, 6.2 e 6.3.

2) Com os dados obtidos construa o gráfico da potência em função da corrente para cada resistor.

3) Por que o resistor de 100Ω/1,15W, na experiência, aqueceu mais que o de 100Ω/5W?

4) Um resistor de fio, quando percorrido por uma corrente de 100 mA, dissipa uma potência de 5W. Determine a nova potência quando ele for submetido a uma tensão igual ao dobro da aplicada.

5) Determine o valor da tensão da fonte para o circuito da Figura 6.3, sabendo que o resistor encontra-se no limite da sua potência e a leitura do miliamperímetro é 50mA.

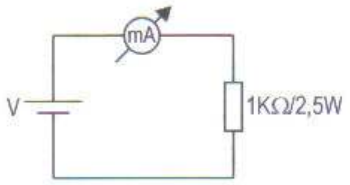


Figura 6.3

EXPERIÊNCIA

7

Circuito Série e Circuito Paralelo de Resistores

Objetivos

- Determinar a resistência equivalente de um circuito série e de um circuito paralelo.
- Constatar, experimentalmente, as propriedades relativas à tensão e corrente de cada associação.

Teoria

Dois ou mais resistores formam uma associação denominada **circuito série** quando ligados um ao outro, conforme esquematizado na Figura 7.1.

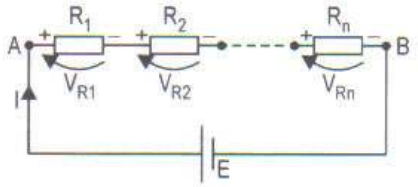


Figura 7.1 - Associação série de resistores.

Quando alimentado, o circuito apresenta as seguintes propriedades:

1) A corrente, que percorre todos os resistores, é a mesma e igual àquela fornecida pela fonte:

$$I = I_{R1} = I_{R2} = ... = I_{Rn}$$

2) O somatório das tensões dos resistores é igual à tensão da fonte:

$$E = V_{R1} + V_{R2} + ... + V_{Rn}$$

Aplicando a lei de Ohm em cada resistor, temos:

$$V_{R1} = R_1 \cdot I$$

$$V_{R2} = R_2 \cdot I$$

$$\vdots$$

$$V_{Rn} = R_n \cdot I$$

utilizando a segunda propriedade, podemos escrever:

$$E = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I + ... + R_n \cdot I$$

dividindo todos os termos por I, resulta:

$$\frac{E}{I} = R_1 + R_2 + ... + R_n$$

Em que $\frac{E}{I}$ representa a **resistência equivalente** de uma associação série. Portanto, podemos escrever:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + ... + R_n$$

Para exemplificar, vamos determinar a resistência equivalente, a corrente e a tensão em cada componente do circuito da Figura 7.2.

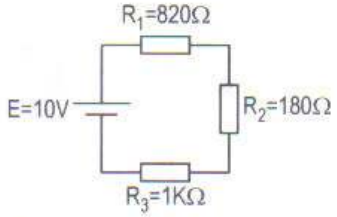


Figura 7.2 - Associação série.

1) Cálculo da resistência equivalente:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{eq} = 820 + 180 + 1000$$

$$R_{eq} = 2000\Omega$$

2) Cálculo da corrente:

$$I = \frac{E}{R_{eq}} \qquad I = \frac{10}{2000} = 5mA$$

3) Cálculo das tensões parciais:

$$V_{R1} = R_1 \cdot I$$

$$V_{R1} = 820 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 4{,}1V$$

$$V_{R2} = 180 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0{,}9V$$

$$V_{R3} = 1000 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 5V$$

Notamos que a soma das tensões parciais é igual à tensão da fonte.

Dois ou mais resistores formam uma associação denominada **circuito paralelo** quando ligados, conforme esquematizado na Figura 7.3.

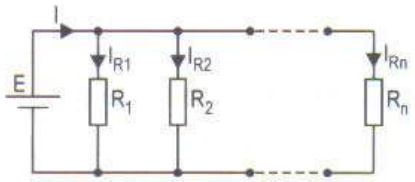


Figura 7.3 - Associação paralela de resistores.

Quando alimentado, o circuito apresenta as seguintes propriedades:

1) A tensão é a mesma em todos os resistores e igual à da fonte:

$$E = V_{R1} = V_{R2} = \ldots = V_{Rn}$$

2) O somatório das correntes dos resistores é igual ao valor da corrente fornecida pela fonte:

$$I = I_{R1} + I_{R2} + \ldots + I_{Rn}$$

Determinando o valor da corrente em cada resistor, temos:

$$I_{R1} = \frac{E}{R_1}$$

$$I_{R2} = \frac{E}{R_2}$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$I_{Rn} = \frac{E}{R_n}$$

Utilizando a igualdade da segunda propriedade, podemos escrever:

$$I = \frac{E}{R_1} + \frac{E}{R_2} + \ldots + \frac{E}{R_n}$$

Dividindo os termos por E, temos:

$$\frac{I}{E} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}$$

Em que $\frac{I}{E}$ representa o inverso da resistência equivalente de uma associação paralela.

Portanto, podemos escrever:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n}$$

Casos Particulares

1) **N** resistores de valores iguais associados em paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + ... + \frac{1}{R}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = N \cdot \frac{1}{R} \quad \therefore \quad R_{eq} = \frac{R}{N}$$

2) Dois resistores associados em paralelo:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2} \quad \therefore \quad R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Concluímos que a resistência equivalente é igual ao produto dos valores dividido pela soma.

Para exemplificar, vamos determinar a resistência equivalente, as correntes parciais e total do circuito da Figura 7.4.

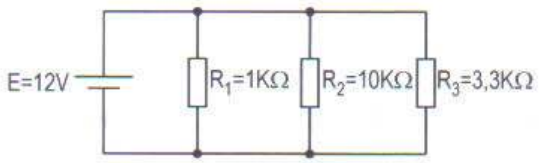


Figura 7.4 - Associação paralela.

1) Cálculo da resistência equivalente:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{10^3} + \frac{1}{10 \cdot 10^3} + \frac{1}{3{,}3 \cdot 10^3} \qquad R_{eq} = 712{,}7\Omega$$

2) Cálculo das correntes parciais:

$$I_{R1} = \frac{E}{R_1} \rightarrow I_{R1} = \frac{12}{10^3} = 12mA$$

$$I_{R2} = \frac{E}{R_2} \rightarrow I_{R2} = \frac{12}{10 \cdot 10^3} = 1{,}2mA$$

$$I_{R3} = \frac{E}{R_3} \rightarrow I_{R3} = \frac{12}{3{,}3 \cdot 10^3} = 3{,}6mA$$

3) Cálculo da corrente total:

$$I = \frac{E}{R_{eq}} = \frac{12}{712{,}7} = 16{,}8mA$$

Notamos que a soma das correntes parciais é igual à corrente total fornecida pela fonte.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 220Ω, 470Ω, 820Ω e 1,2KΩ.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 7.5. Meça e anote no Quadro 7.1 a resistência equivalente entre os pontos A e E.

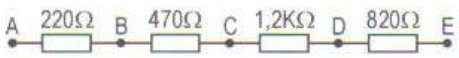


Figura 7.5

R_{eqAE} medido	
R_{eqAE} calculado	

Quadro 7.1

2) Ajuste a fonte variável para 12V e alimente o circuito, conforme mostra a Figura 7.6.

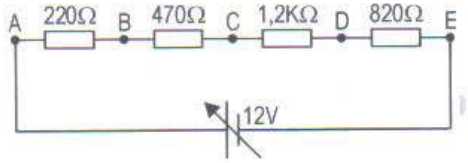


Figura 7.6

3) Meça as correntes em cada ponto do circuito, a tensão em cada resistor e anote os resultados nos Quadros 7.2 e 7.3.

I_A	I_B	I_C	I_D	I_E

Quadro 7.2

R (Ω)	220	470	1,2K	820
V (V)				

Quadro 7.3

4) Monte o circuito da Figura 7.7. Meça e anote no Quadro 7.4 a resistência equivalente entre os pontos A e B.

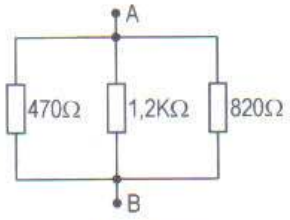


Figura 7.7

R_{eqAB} medido	
R_{eqAB} calculado	

Quadro 7.4

5) Alimente o circuito com a fonte ajustada para 12V, como mostra a Figura 7.8.

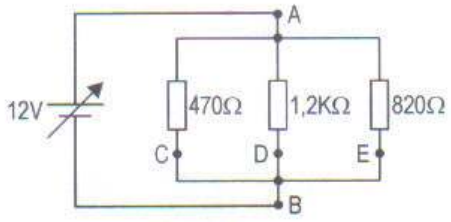


Figura 7.8

6) Meça as correntes em cada ponto do circuito, a tensão em cada resistor e anote os resultados nos Quadros 7.5 e 7.6.

I_A	I_B	I_C	I_D	I_E

Quadro 7.5

R(Ω)	470	1,2K	820
V (V)			

Quadro 7.6

Exercícios

1) Calcule a resistência equivalente de cada circuito utilizado na experiência, anotando os resultados, respectivamente, nos Quadros 7.1 e 7.4. Compare os valores medidos com os calculados e explique as discrepâncias.

2) No circuito da Figura 7.6, o que observou quanto aos valores das correntes que mediu? E quanto aos valores de tensões?

3) Repita o segundo exercício para o circuito da Figura 7.8.

4) Determine os valores lidos pelos instrumentos em cada circuito da Figura 7.9.

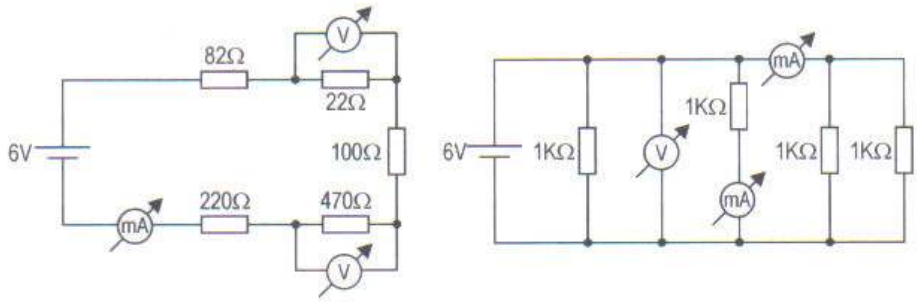


Figura 7.9

5) No circuito da Figura 7.10, a leitura do amperímetro é de 28,6mA. Calcule o valor de R.

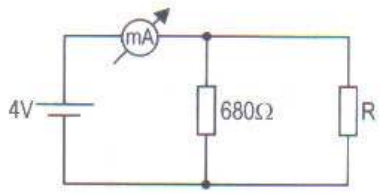


Figura 7.10

6) Calcule o valor da tensão da bateria para o circuito da Figura 7.11, sabendo que o voltímetro indica 3V.

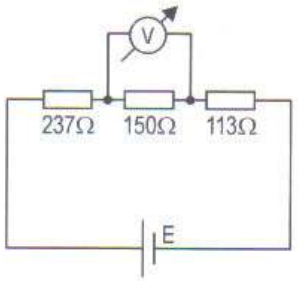


Figura 7.11

EXPERIÊNCIA

8

Circuito Série-Paralelo

Objetivos

- Identificar em um circuito as associações série e paralela.
- Determinar a resistência equivalente de um circuito série-paralelo.

Teoria

Denominamos circuito série-paralelo ou misto aquele formado por associações série e paralela, onde respectivamente suas propriedades são válidas. Como exemplo tomemos um circuito genérico, visto na Figura 8.1.

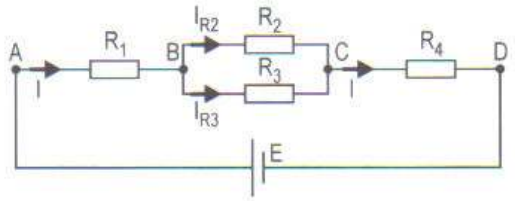


Figura 8.1 - Associação mista de resistores.

A corrente I fornecida pela fonte percorre R_1 e no ponto B divide-se em duas correntes, sendo I_{R2} e I_{R3}, com valores proporcionais aos dos resistores R_2 e R_3. Em seguida, estas serão somadas no ponto C, percorrendo o resistor R_4. Subdividindo o circuito, encontramos uma associação paralela composta por R_2 e R_3 formando com R_1 e R_4 uma associação série. Portanto, podemos substituir o conjunto formado por R_2 e R_3 por sua resistência equivalente, conforme mostra a Figura 8.2.

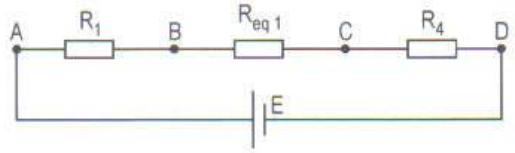


Figura 8.2 - Associação série resultante da Figura 8.1.

sendo: $$R_{eq1} = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}$$

e a resistência equivalente do circuito será: $R_{eq} = R_1 + R_{eq1} + R_4$

Para exemplificar, vamos determinar a resistência equivalente, a corrente total, as correntes e as tensões em cada componente do circuito da Figura 8.3.

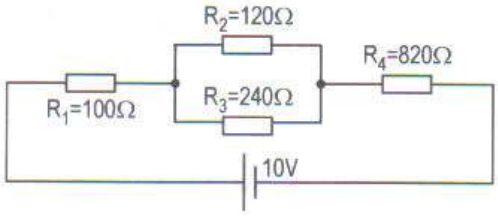


Figura 8.3 - Associação mista.

1) Cálculo da R_{eq}:

$$R_{eq} = 100 + \frac{120 \cdot 240}{120 + 240} + 820 \qquad \therefore \qquad R_{eq} = 1K\Omega$$

2) Cálculo da corrente total:

$$I = \frac{E}{R_{eq}} = \frac{10}{10^3} = 10mA$$

3) Cálculo das tensões parciais:

$$V_{R1} = R \cdot I = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 1V$$

$$V_{R2} = V_{R3} = R_{eq1} \cdot I = \frac{120 \cdot 240}{120 + 240} \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 0{,}8V$$

propriedade do circuito paralelo

$$V_{R4} = R_4 \cdot I = 820 \cdot 10 \cdot 10^3 = 8{,}2V$$

4) Cálculo das correntes parciais:

$I_{R1} = I_{R4} = 10mA$ (propriedade do circuito série)

$$I_{R2} = \frac{V_{R2}}{R_2} = \frac{0{,}8}{120} = 6{,}7mA$$

$$I_{R3} = \frac{V_{R3}}{R_3} = \frac{0{,}8}{240} = 3{,}3mA$$

- Fonte variável.
- Resistores: 120Ω, 330Ω, 390Ω, 470Ω, 680Ω e 1200Ω.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 8.4. Meça e anote no Quadro 8.1 a resistência equivalente entre os pontos A e D.

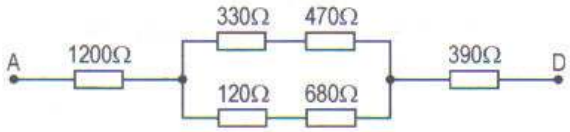


Figura 8.4

R_{eqAD} medida	
R_{eqAD} calculada	

Quadro 8.1

2) Ajuste a fonte para 12V e alimente o circuito, de acordo com a Figura 8.5.

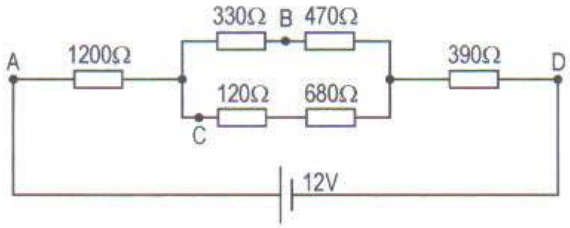


Figura 8.5

3) Meça as correntes em cada ponto do circuito, a tensão em cada resistor e anote os resultados nos Quadros 8.2 e 8.3.

I_A	I_B	I_C	I_D

Quadro 8.2

R(Ω)	1200	330	470	120	680	390
V(V)						

Quadro 8.3

1) Calcule a resistência equivalente do circuito da Figura 8.4, anote o valor no Quadro 8.1 e compare com o valor medido, explicando a eventual discrepância.

2) Para o circuito da Figura 8.5 verifique se a corrente no ponto A é igual à soma da corrente no ponto B com a corrente no ponto C. Comente o resultado.

3) Para o circuito da Figura 8.5 compare a soma das tensões dos resistores de 330Ω e 470Ω com a dos resistores de 120Ω e 680Ω. Comente o resultado.

4) Determine a tensão e a corrente em cada componente do circuito da Figura 8.6.

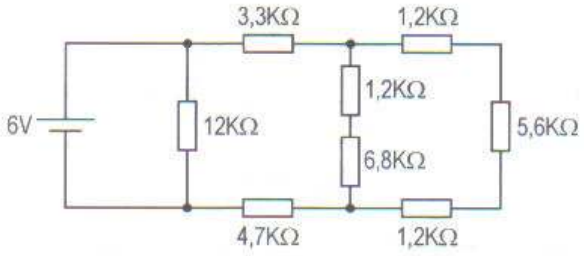


Figura 8.6

5) No circuito da Figura 8.7, sabendo que a leitura do miliamperímetro é 6mA e a do voltímetro é 3,51V, calcule o valor da fonte E e do resistor R.

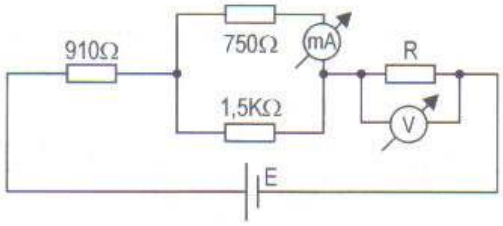


Figura 8.7

EXPERIÊNCIA

9

Potenciômetro

Objetivos

- Conhecer os tipos de potenciômetro.
- Medir a variação da resistência do potenciômetro.

Teoria

Quando estudamos os resistores, vimos que eles podem ser divididos em fixos e variáveis. Os resistores variáveis são conhecidos como potenciômetros, devido às suas aplicações como divisores da tensão em circuitos eletrônicos.

Um potenciômetro, Figura 9.1, consiste basicamente em uma película de carbono, ou em um fio que, percorrido por um cursor móvel por meio de um sistema rotativo ou deslizante, altera o valor da resistência entre seus terminais. Comercialmente os potenciômetros são especificados pelo valor nominal da resistência máxima, impresso em seu corpo.

Na prática, encontramos vários modelos de potenciômetro, que em função do tipo de aplicação possuem características mecânicas diversas. A Figura 9.2 exibe um potenciômetro de fio e a Figura 9.3, alguns tipos de potenciômetro de película de carbono.

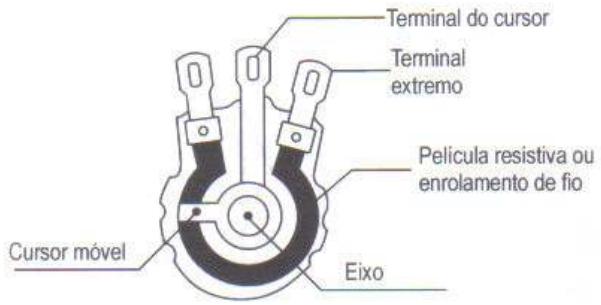


Figura 9.1 - Estrutura interna básica de um potenciômetro.

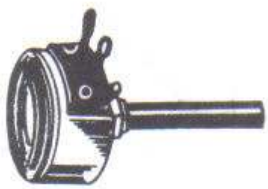


Figura 9.2 - Potenciômetro de fio.

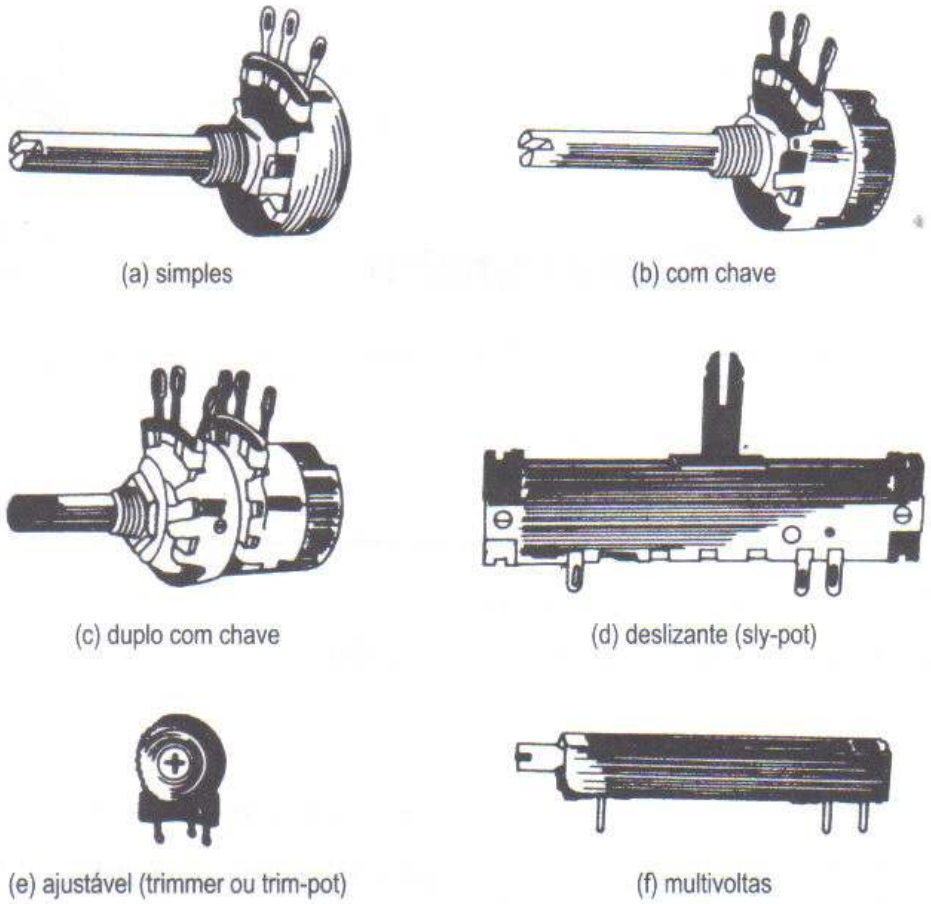


Figura 9.3 - Potenciômetros de película de carbono.

Os potenciômetros de fio são utilizados em situações em que é maior a sua dissipação de potência, possuindo uma faixa de baixos valores de resistência (até KΩ). Os potenciômetros de película são aplicados em situações de menor dissipação de potência, possuindo uma ampla faixa de valores de resistência (até MΩ).

Quanto à variação de resistência, os potenciômetros de película de carbono podem ser lineares ou logarítmicos, isto é, conforme a rotação de seu eixo, sua resistência varia, obedecendo a uma característica linear ou logarítmica. Essas características são vistas nas Figuras 9.4 e 9.5.

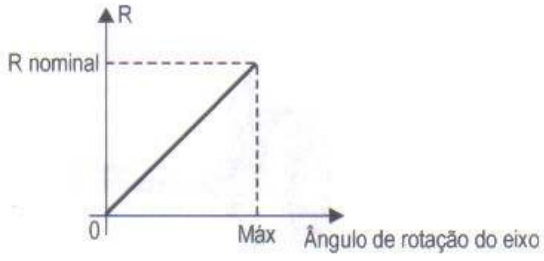


Figura 9.4 - Característica de variação de um potenciômetro linear (LIN).

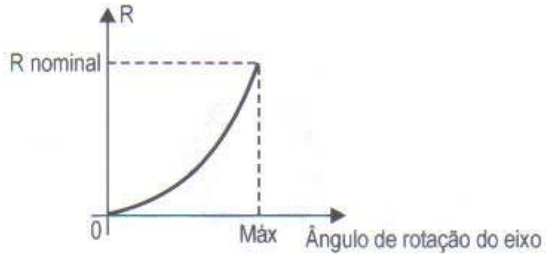


Figura 9.5 - Característica de variação de um potenciômetro logarítmico (LOG).

Para medir a variação da resistência de um potenciômetro, utilizamos um ohmímetro, que deve ser conectado entre o terminal central e um dos extremos, Figura 9.6.

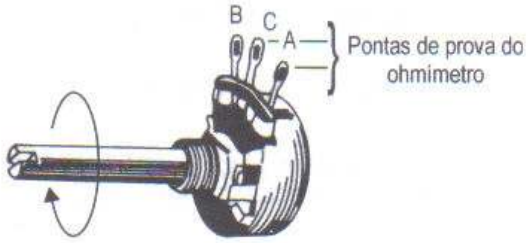


Figura 9.6 - Medida da resistência de um potenciômetro.

Ao girar o eixo no sentido horário, como mostra a figura, ocorre aumento da resistência entre os terminais A e C e diminuição proporcional entre os terminais B e C, observando que a soma dos dois valores será igual à resistência nominal.

Material Experimental

- Potenciômetro: 1KΩ/LIN e 1KΩ/LOG.
- Multímetro.

Simbologia

Parte Prática

1) Meça e anote no Quadro 9.1 a resistência nominal do potenciômetro de 1KΩ/LIN, colocando as pontas de prova do ohmímetro entre os extremos A e B, conforme a Figura 9.7.

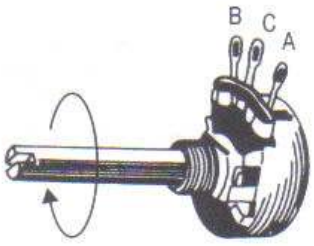


Figura 9.7

2) Gire o eixo do potenciômetro totalmente no sentido horário, meça e anote no Quadro 9.1 a resistência entre os terminais A e C (R_{AC} hor.)

3) Repita o item anterior, girando o eixo no sentido anti-horário (R_{AC} ant.).

4) Com o ohmímetro conectado entre os terminais A e C, gire o eixo e observe a variação da resistência.

5) Repita o item 4 com o ohmímetro conectado entre B e C.

6) Repita o item 4 com o ohmímetro entre A e B.

7) Repita os itens anteriores utilizando um potenciômetro de 1KΩ/LOG e preencha o Quadro 9.1.

Potenciômetro	R_{AB}	R_{AC} hor.	R_{AC} ant.
1KΩ LIN			
1KΩ LOG			

Quadro 9.1

Exercícios

1) Compare a variação da resistência do potenciômetro linear com a do logarítmico e escreva sua conclusão.

2) Onde você aplicaria um potenciômetro logarítmico?

3) Como você utilizaria um resistor de fio como um potenciômetro?

4) Determine a leitura do voltímetro para o circuito da Figura 9.8, sabendo que o cursor encontra-se posicionado em dois terços da resistência total.

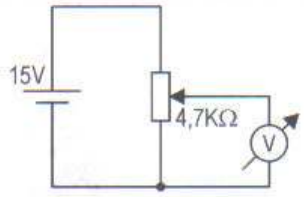


Figura 9.8

5) Substituindo o potenciômetro da questão anterior por um de 330KΩ nas mesmas condições, qual é a leitura do voltímetro?

EXPERIÊNCIA

10

Divisor de Tensão

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o divisor de tensão fixa e variável com ou sem carga.

Teoria

O divisor de tensão, basicamente, consiste em um arranjo de resistores de tal forma a subdividir a tensão total em valores específicos aplicáveis.

O circuito da Figura 10.1 possui dois resistores, sendo R_1 e R_2, associados em série, alimentados por uma tensão E, formando um **divisor de tensão fixa sem carga**.

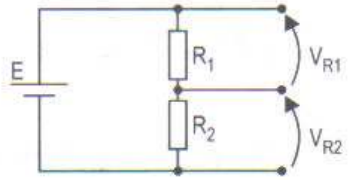


Figura 10.1 - Divisor de tensão fixa sem carga.

Analisando o circuito, temos: $V_{R1} = R_1 \cdot I \qquad V_{R2} = R_2 \cdot I$

sendo:
$$I = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

substituindo, temos:

$$V_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot E \qquad V_{R2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E$$

ou seja, dividimos a tensão E em dois valores V_{R1} e V_{R2}, respectivamente, proporcionais a R_1 e a R_2.

No circuito da Figura 10.2 temos um **divisor de tensão fixa ligado a uma carga R_L**.

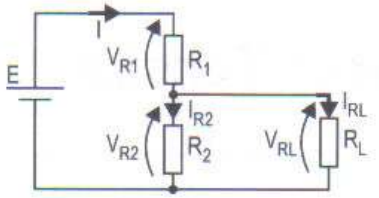


Figura 10.2 - Divisor de tensão fixa com carga.

Ao conectarmos uma carga R_L a esse circuito, constatamos que há modificações de tal forma a alterar os valores das correntes e das tensões.

Analisando o circuito, podemos escrever:

$$E = V_{R1} + V_{R2}$$

$$V_{R2} = V_{RL} \qquad \therefore \qquad E = V_{R1} + V_{RL}$$

$$I = I_{R2} + I_{RL}$$

sendo:
$$I = \frac{E - V_{RL}}{R_1} \text{ e } I_{R2} = \frac{V_{RL}}{R_2}$$

$\therefore$ temos:
$$\frac{E - V_{RL}}{R_1} = \frac{V_{RL}}{R_2} + I_{RL}$$

eliminando os denominadores e isolando o valor de V_{RL}, temos:

$$R_2 \cdot E - R_2 \cdot V_{RL} = R_1 \cdot V_{RL} + R_1 \cdot R_2 \cdot I_{RL}$$

$$R_2 \cdot E - R_1 \cdot R_2 \cdot I_{RL} = R_1 \cdot V_{RL} + R_2 \cdot V_{RL}$$

$$R_2 \cdot E - R_1 \cdot R_2 \cdot I_{RL} = (R_1 + R_2) \cdot V_{RL}$$

$$V_{RL} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E - \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot I_{RL}$$

O circuito da Figura 10.3 apresenta um potenciômetro alimentado por uma tensão E, formando um **divisor de tensão variável sem carga**.

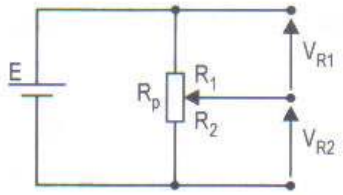


Figura 10.3 - Divisor de tensão variável sem carga.

Ajustando o cursor em uma posição fixa, dividimos R_p em duas resistências em série R_1 e R_2, valendo as mesmas relações vistas no divisor de tensão fixa:

$$V_{R1} = \frac{R_1}{R_p} \cdot E \text{ e } V_{R2} = \frac{R_2}{R_p} \cdot E$$

No circuito da Figura 10.4 encontra-se um **divisor de tensão variável, ligado a uma carga R_L**.

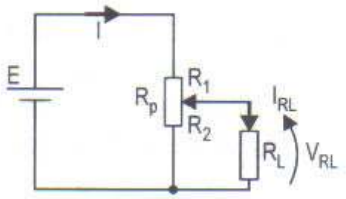


Figura 10.4 - Divisor de tensão variável com carga.

Da mesma maneira, utilizando as relações do divisor de tensão fixa com carga, temos:

$$V_{RL} = \frac{R_2}{R_p} \cdot E - \frac{R_1 \cdot R_2}{R_p} \cdot I_{RL}$$

Para exemplificar, vamos utilizar os conceitos vistos nos exemplos 1, 2, 3 e 4.

1) Neste exemplo, vamos calcular as tensões parciais no circuito divisor de tensão da Figura 10.5.

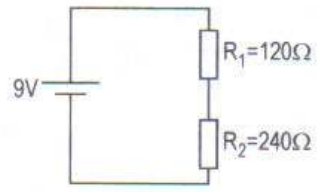


Figura 10.5

$$V_{R2} = \frac{240}{240+120} \cdot 9 = 6V$$

$$V_{R1} = \frac{120}{240+120} \cdot 9 = 3V$$

2) Neste caso vamos dimensionar R_2 para atender às especificações da lâmpada do circuito da Figura 10.6.

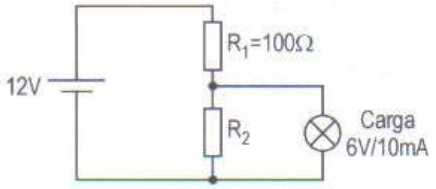


Figura 10.6

$$\frac{R_2}{R_1+R_2}\cdot E-\frac{R_1\cdot R_2}{R_1+R_2}\cdot I_{RL}=V_{RL}$$

$$\frac{R_2}{100+R_2}\cdot 12-\frac{100\cdot R_2}{100+R_2}\cdot 10\cdot 10^{-3}=6$$

$$12\cdot R_2-R_2=6(100+R_2)$$

$$12\cdot R_2-R_2=600+6\cdot R_2$$

$$5\cdot R_2=600 \quad \therefore \quad R_2=120\Omega$$

3) Vamos determinar a variação da tensão entre os postos A e C do circuito da Figura 10.7.

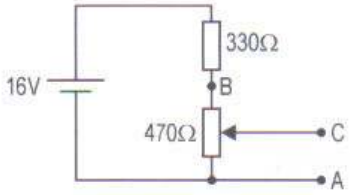


Figura 10.7

Quando o cursor estiver voltado para a extremidade A, a tensão será nula, e quando estiver voltado para a extremidade B, a tensão será calculada, utilizando a resistência total do potenciômetro:

$$V_{AC}=\frac{470}{330+470}\cdot 16=9{,}4V$$

Portanto, a tensão entre os pontos A e C varia de 0 a 9,4V, dependendo da posição ajustada para o cursor.

4) Para o circuito da Figura 10.8, vamos calcular a tensão entre A e C quando ligarmos uma carga de 160Ω, mantendo o cursor na extremidade para máxima tensão. Essa situação é vista na Figura 10.8.

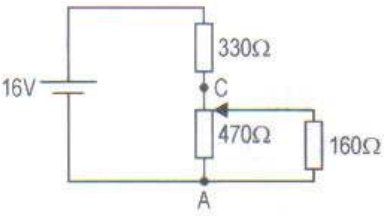


Figura 10.8

Utilizando a equação do divisor de tensão variável com carga, temos:

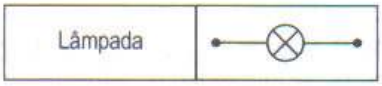
$$\frac{470}{330+470}\cdot 16-\frac{330\cdot 470}{330+470}\cdot\frac{V_{RL}}{160}=V_{RL}$$

$$9{,}4-1{,}21\cdot V_{RL}=V_{RL} \quad \therefore \quad V_{RL}=4{,}25V$$

Quando ligamos a carga de 160Ω, a tensão V_{AC} cai para 4,25V, devido ao consumo de corrente.

- Fonte variável.
- Resistores: 100Ω, 330Ω, 1KΩ e 2,2K Ω (todos 0,67W).
- Potenciômetro: 1KΩ/LIN.
- Lâmpada: 12V/40mA.
- Multímetro.

Simbologia



Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 10.9. Meça e anote no Quadro 10.1, os valores de V_{R1} e V_{R2}.

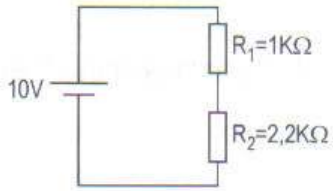


Figura 10.9

V_{R1} med.	V_{R1} calc.	V_{R2} med.	V_{R2} calc.

Quadro 10.1

2) Monte o circuito da Figura 10.10. Meça a mínima e a máxima tensão entre os pontos A e C, anotando os valores no Quadro 10.2.

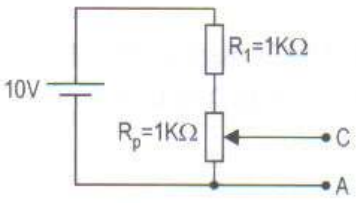


Figura 10.10

V_{AC} mín. medido	V_{AC} mín. calculado	V_{AC} máx. medido	V_{AC} máx. calculado

Quadro 10.2

3) Monte o circuito da Figura 10.11. Meça e anote no Quadro 10.3 a tensão e a corrente na carga.

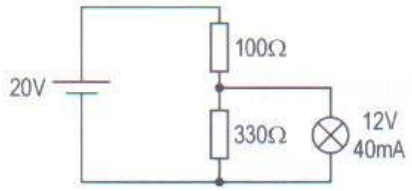


Figura 10.11

V_{RL}	I_{RL}	P_{RL}

Quadro 10.3

Exercícios

1) Para o circuito da Figura 10.9 calcule V_{R1} e V_{R2}, preenchendo o Quadro 10.1. Compare os resultados e tire conclusões.

2) Para o circuito da Figura 10.10 calcule $V_{AC\ min.}$ e $V_{AC\ máx.}$, preenchendo o Quadro 10.2. Compare os resultados e tire conclusões.

3) Calcule a potência da lâmpada com os valores obtidos no item 3 da parte prática, anotando no Quadro 10.3.

4) Determine a leitura do voltímetro para o circuito da Figura 10.12, com a chave S aberta e fechada.

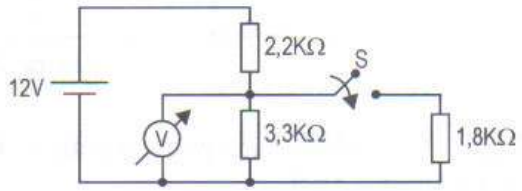


Figura 10.12

5) Determine a leitura do voltímetro do circuito da Figura 10.13, estando o potenciômetro com o cursor ajustado na extremidade A, na extremidade B e na posição central.

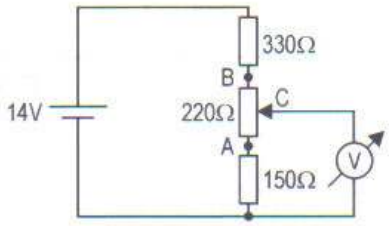


Figura 10.13

EXPERIÊNCIA

11

Geradores Elétricos

Objetivo

- Determinar, experimentalmente, a resistência interna, a força eletromotriz e a corrente de curto-circuito de um gerador.

Teoria

Geradores elétricos são dispositivos que mantêm entre seus terminais uma diferença de potencial obtida a partir de uma conversão de outro tipo de energia em energia elétrica.

Essa conversão pode ser de várias formas, destacando-se os geradores que transformam energia mecânica, química e térmica em energia elétrica, denominados, respectivamente, de geradores eletromecânicos, eletroquímicos e eletrotérmicos.

Como exemplos de geradores eletroquímicos temos as **pilhas** e **baterias**, que a partir de uma reação química separam as cargas elétricas positivas das negativas, provocando o aparecimento de uma tensão elétrica entre dois terminais denominados polos.

Como geradores eletromecânicos existem os **dínamos** e os **alternadores**, que a partir de um movimento mecânico geram, respectivamente, energia elétrica contínua e alternada.

Como gerador termoelétrico há o **par termoelétrico** em que dois metais diferentes recebem calor e proporcionalmente geram uma tensão entre seus terminais.

Um gerador elétrico alimentando uma carga deve fornecer tensão e corrente que ela exigir. Portanto, na realidade, o gerador fornece tensão e corrente.

O gerador ideal é aquele que fornece uma tensão constante, denominada **força eletromotriz (E)**, qualquer que seja a corrente exigida pela carga. Seu símbolo e sua curva característica, tensão em função da corrente, são mostrados na Figura 11.1.

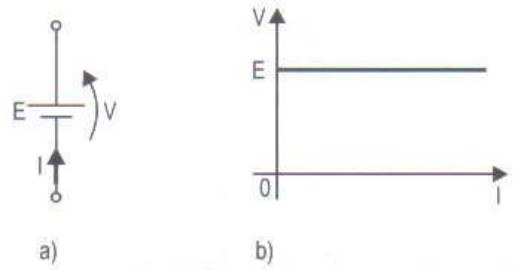


Figura 11.1 - (a) Gerador ideal; (b) curva característica de um gerador ideal.

O gerador real perde energia internamente, portanto a tensão de saída não é constante, sendo atenuada com o aumento da corrente exigida pela carga. Podemos representar essa perda por uma resistência interna (r) e, consequentemente, o gerador real como um gerador ideal em série com essa resistência, como indica a Figura 11.2.

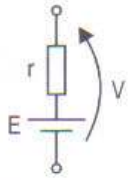


Figura 11.2 - Gerador real.

Do circuito equivalente ao gerador real, observamos que a resistência interna causa uma queda da tensão de saída, quando ele estiver alimentando uma carga. Essa situação é mostrada na Figura 11.3.

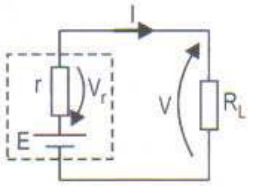


Figura 11.3 - Gerador real alimentando uma carga.

Aplicando a lei de Ohm, podemos escrever:

$$I = \frac{E}{r + R_L} \qquad E = (r + R_L) \cdot I \qquad E = r \cdot I + R_L \cdot I$$

sendo: $R_L \cdot I = V \therefore V = E - r \cdot I$ equação do gerador real

Da equação obtemos a curva característica do gerador real, vista na Figura 11.4.

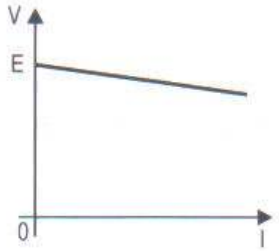


Figura 11.4 - Característica de um gerador real.

Pela curva notamos que, ao aumentarmos o valor da corrente, a tensão diminui, e quando ela atingir o valor zero, teremos um valor de corrente que se denomina **corrente de curto-circuito (I_{cc})**, pois nessas condições o gerador encontra-se curto-circuitado.

A característica completa é ilustrada na Figura 11.5.

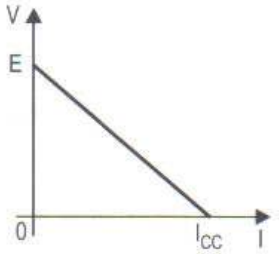


Figura 11.5 - Característica completa de um gerador real.

Na condição de curto-circuito, temos que:

$$V = E - r \cdot I \qquad 0 = E - r \cdot I_{cc} \qquad I_{cc} = \frac{E}{r}$$

A corrente de curto-circuito, bem como a resistência interna do gerador, deve ser obtida experimentalmente, ou seja, levantando a curva característica do gerador e extraindo dela esses dois parâmetros, conforme apresenta a Figura 11.6.

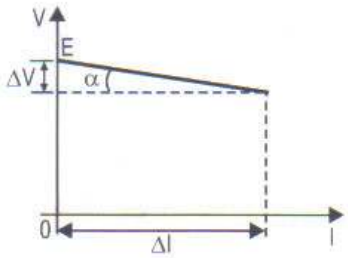


Figura 11.6 - Curva característica de um gerador real.

$$r = tg\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta I} \qquad e \qquad I_{cc} = \frac{E}{r}$$

Exemplo

O gráfico da Figura 11.7 representa a curva característica de um gerador. Determinar a resistência interna, a corrente de curto-circuito e a equação do gerador.

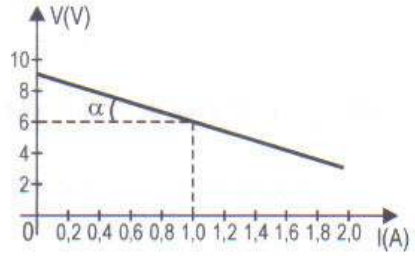


Figura 11.7 - Curva característica de um gerador.

$$r = tg\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta I} \qquad r = \frac{9-6}{1} = 3\Omega$$

$$I_{cc} = \frac{E}{r} = \frac{9}{3} = 3A \qquad \text{equação: } V = 9 - 3 \cdot I$$

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 100Ω/1,15W e 1KΩ.
- Década resistiva.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 11.8. Ajuste a tensão da fonte para 10V.

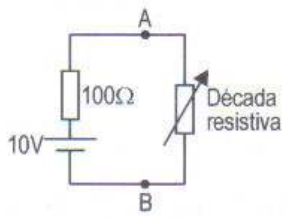


Figura 11.8

2) Meça a tensão entre os pontos A e B com a década desconectada. Anote esse valor no Quadro 11.1.

E(V)	

Quadro 11.1

3) Ajuste a resistência da década de acordo com o Quadro 11.2. Meça e anote para cada valor a tensão e a corrente na carga.

R(Ω)	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
V(V)										
I(mA)										

Quadro 11.2

4) Substitua o resistor de 100Ω por outro de 1KΩ e repita os itens 2 e 3, anotando os valores nos Quadros 11.3 e 11.4.

E(V)	

Quadro 11.3

R(Ω)	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
V(V)										
I(mA)										

Quadro 11.4

Observação: *Os resistores de 100Ω e 1KΩ simulam a resistência interna do gerador, pois uma fonte estabilizada, dentro de uma faixa de corrente, comporta-se como um gerador ideal.*

Exercícios

1) Com os dados obtidos construa a curva característica do gerador V = f(I) para ambos os casos.

2) Determine as resistências internas e as correntes de curto-circuito por intermédio das curvas.

3) Escreva as equações dos geradores.

4) Determine a equação do gerador da Figura 11.9, sabendo que, estando a chave S na posição 1, o voltímetro indica 9V e o miliamperímetro 600mA, e quando na posição 2, o voltímetro indica 9,6V e o miliamperímetro 480mA.

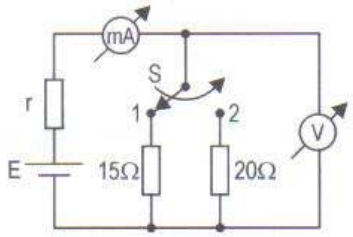


Figura 11.9

5) Um gerador em vazio apresenta uma tensão de saída igual a 15V. Quando ligarmos aos terminais deste uma lâmpada de 6W, ela vai consumir uma corrente de 500mA. Escreva a equação desse gerador.

EXPERIÊNCIA

12

Máxima Transferência de Potência

Objetivos

- Levantar a curva característica da potência de um gerador.
- Verificar, experimentalmente, os parâmetros em que a potência transferida pelo gerador é máxima.

Teoria

Como vimos na experiência anterior, um gerador real apresenta perdas internas, fenômeno este que faz com que a tensão de saída diminua de valor com o aumento do consumo de corrente. Analisando em termos de potência, podemos dizer que a potência útil ou aproveitável na saída é aquela gerada com exclusão da potência perdida internamente, ou seja,

$$P_u = P_G - P_p$$

sendo: $P_u = V \cdot I$ - potência útil

$P_G = E \cdot I$ - potência gerada

$P_p = r \cdot I^2$ - potência perdida

Podemos escrever que a potência transferida pelo gerador é $P_u = E \cdot I - r \cdot I^2$ e o rendimento η como a relação entre a potência útil e a potência gerada:

$$\eta = \frac{P_u}{P_G} = \frac{V \cdot I}{E \cdot I} = \frac{V}{E}$$

Notamos que a equação da potência útil representa uma função de 2º grau, em que E e r são parâmetros constantes, sendo a potência e a corrente variáveis em função da carga.

Levantando essa caraterística, temos uma **parábola** vista na Figura 12.1.

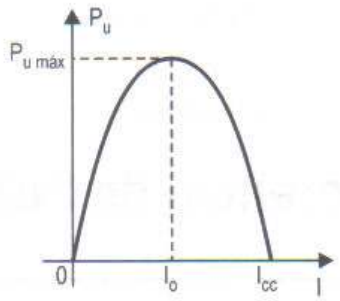


Figura 12.1 - Característica da potência útil de um gerador.

como: $$P_u = E \cdot I - r \cdot I^2$$

temos que: $$P_u = I \cdot (E - r \cdot I)$$

sendo $P_u = 0$, quando $I = 0$ ou quando $E - r \cdot I = 0$

Do segundo, resulta $I = \frac{E}{r} = I_{cc}$ (corrente de curto-circuito)

Sendo a parábola uma figura simétrica, concluímos que a potência será máxima quando a corrente for igual à metade do valor da corrente de curto-circuito, isto é:

$$I_o = \frac{I_{cc}}{2} \text{ e como } I_{cc} = \frac{E}{r}, \text{ temos que } I_o = \frac{E}{2 \cdot r}$$

Para determinar a potência máxima, basta substituir na equação da potência útil o valor de I por $\frac{E}{2r}$. Procedendo assim, temos:

$$P_{u\,máx} = E \cdot \frac{E}{2 \cdot r} - r\left(\frac{E}{2 \cdot r}\right)^2$$

$$P_{u\,máx} = \frac{E^2}{2 \cdot r} - \frac{E^2}{4 \cdot r} \quad \therefore \quad P_{u\,máx} = \frac{E^2}{4 \cdot r}$$

Substituindo na equação do gerador o valor da corrente por $I_o = \frac{E}{2 \cdot r}$, obtemos a tensão relativa a esse ponto de máxima potência:

$$V_o = E - r \cdot I_o \qquad V_o = E - r \cdot \frac{E}{2 \cdot r}$$

sendo: $$V_o = \frac{E}{2}$$

Portanto, estando o gerador na condição de máxima potência, a tensão de saída será $V_o = \frac{E}{2}$ e a corrente $I_o = \frac{E}{2 \cdot r}$. Por meio desses parâmetros podemos estabelecer o valor da carga.

$$R_L = \frac{V_o}{I_o} \qquad R_L = \frac{\frac{E}{2}}{\frac{E}{2 \cdot r}} \qquad \therefore \quad R_L = r$$

Então, concluímos que, para extrair a máxima transferência de potência de um gerador, a carga deve ter um valor igual ao da resistência interna deste. E nestas condições, o rendimento do gerador será:

$$\eta = \frac{P_u}{P_G} \qquad \eta = \frac{V_o}{E} = \frac{\frac{E}{2}}{E} = 0{,}5$$

Exemplo

A curva da potência útil de um gerador é dada na Figura 12.2. Determine a equação do gerador, a corrente de curto-circuito e o rendimento, quando este estiver alimentando uma carga que consome 0,5A.

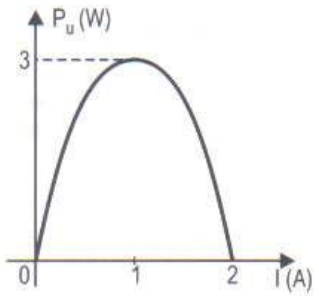


Figura 12.2 - Curva de potência.

Da curva característica, temos que $I_{cc} = 2A$ e $P_{u\,máx} = 3W$.

$$I_{cc} = \frac{E}{r} = 2 \rightarrow E = 2 \cdot r \qquad \text{(I)}$$

$$P_{u\,máx} = \frac{E^2}{4 \cdot r} = 3 \qquad \text{(II)}$$

Substituindo (I) em (II), temos: $\frac{(2\cdot r)^2}{4\cdot r} = 3 \quad \therefore \quad r = 3\Omega$

De (I) temos que $E = 2\cdot r = 2\cdot 3 = 6V \ \therefore$, a equação será: $V = 6 - 3\cdot I$

Quando a carga consumir 0,5A, substituindo na equação do gerador, a tensão de saída será:

$$V = 6 - 3\cdot 0{,}5 \rightarrow V = 4{,}5V$$

Nessas condições, o rendimento será: $\eta = \frac{V}{E} \quad \eta = \frac{4{,}5}{6} = 0{,}75$

Em valor percentual, temos que o gerador possui um rendimento de 75%.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 100Ω/1,15W.
- Década resistiva.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 12.3. Ajuste a tensão da fonte para 10V.

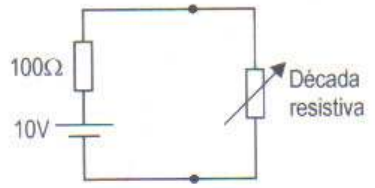


Figura 12.3

2) Ajuste a resistência da década de acordo com o Quadro 12.1. Para cada valor, meça e anote a tensão e a corrente na carga.

R(Ω)	1000	800	600	400	200	100	80	60	40	20	0
V(V)											
I(mA)											
Pu(mW)											
η%											

Quadro 12.1

Exercícios

1) Calcule a potência útil e o rendimento do gerador para cada valor de resistência ajustada na década, preenchendo o Quadro 12.1.

2) Com os dados obtidos levante a curva da potência útil em função da corrente Pu = f(I).

3) Determine, graficamente, a potência útil máxima transferida pelo gerador e a corrente de curto-circuito.

4) Determine o valor da resistência de carga, da tensão do gerador, da corrente e o rendimento para máxima transferência de potência do gerador.

5) Escreva a equação do gerador da Figura 12.4, que alimenta a associação dos resistores na situação de máxima transferência de potência.

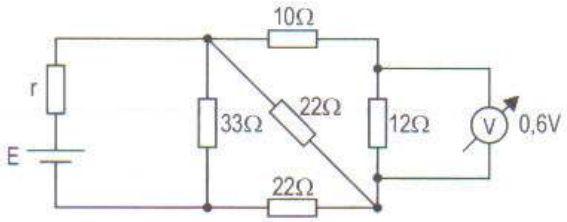


Figura 12.4

Anotações

EXPERIÊNCIA

13

Leis de Kirchhoff

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, as leis de Kirchhoff.

Teoria

Um circuito elétrico pode ser composto de várias malhas, constituídas por elementos que geram ou absorvem energia elétrica. Para calcular as tensões e correntes nesses elementos, necessitamos utilizar as leis de Kirchhoff, devido à complexidade do circuito.

Para utilizar essas leis, precisamos destacar trechos nos quais se aplicam propriedades, facilitando o equacionamento.

Um circuito é composto de **malhas**, **nós** e **ramos**. Definimos **malha** como todo circuito fechado constituído por elementos elétricos. Denominamos **nó** um ponto de interligação de três ou mais componentes, e **ramo** o trecho compreendido entre dois nós consecutivos.

A Figura 13.1 apresenta um circuito elétrico em que vamos exemplificar os conceitos até agora vistos.

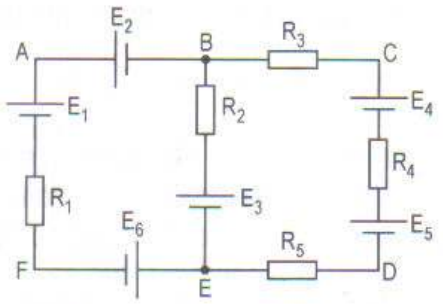


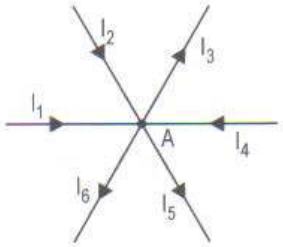
Figura 13.1 - Circuito elétrico.

Notamos que o circuito é composto de três malhas, **ABEF**, **BCDE** e **ABCDEF**, sendo esta última denominada malha externa. Os pontos **B** e **E** formam dois nós, em que se interligam geradores e resistores, constituindo três ramos distintos: o ramo à esquerda composto por E_6, R_1, E_1 e E_2, o ramo central composto por E_3 e R_2 e o ramo à direita, composto por R_5, E_5, R_4, E_4 e R_3.

Após essas considerações, podemos enunciar as leis de Kirchhoff.

1ª lei: em um nó, a soma algébrica das correntes é nula.

Exemplo

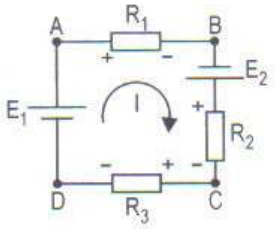


Para o nó A, consideramos as correntes que chegam como positivas e as que saem como negativas, portanto podemos escrever:

$$I_1 + I_2 - I_3 + I_4 - I_5 - I_6 = 0 \quad \text{ou} \quad I_1 + I_2 + I_4 = I_3 + I_5 + I_6$$

2ª lei: em uma malha, a soma algébrica das tensões é nula.

Exemplo



Para a malha ABCD, partindo do ponto A no sentido horário adotado, podemos escrever:

$$-V_{R1} + E_2 - V_{R2} - V_{R3} + E_1 = 0 \quad \text{ou} \quad E_1 + E_2 = V_{R1} + V_{R2} + V_{R3}$$

em que o sinal positivo representa um aumento de potencial e o sinal negativo uma perda de potencial, isto é, os resistores, ao serem percorridos pela corrente do circuito, imposta pelas baterias, apresentam queda de tensão contrária em relação ao sentido da corrente.

Para aplicar as leis de Kirchhoff, tomemos como exemplo o circuito da Figura 13.2, em que vamos calcular as correntes nos três ramos.

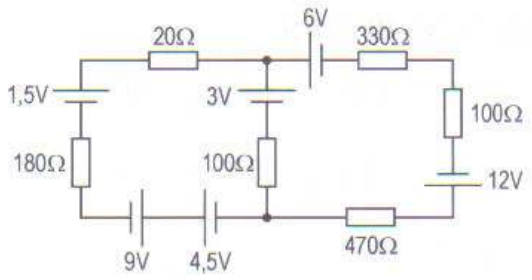


Figura 13.2 - Circuito elétrico.

Primeiramente, vamos adotar uma corrente para cada malha, sentido horário, conforme mostra a Figura 13.3. Se ele estiver errado, encontraremos um resultado negativo, mas com valor numérico correto.

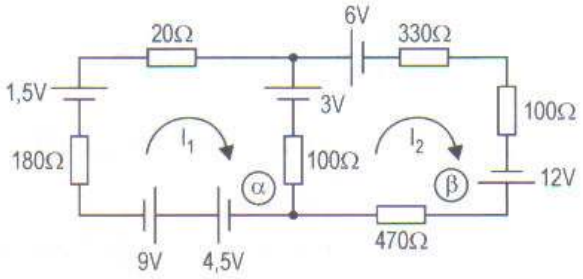


Figura 13.3 - Circuito elétrico com as correntes de cada malha.

Utilizando a 2ª lei de Kichhoff, podemos equacionar cada malha:

Malha α: $+4{,}5-9-180\cdot I_1+1{,}5-20\cdot I_1-3-100(I_1-I_2)=0$

$$4{,}5-9+1{,}5-3-300\cdot I_1+100\cdot I_2=0$$

$$-300\cdot I_1+100\cdot I_2=6 \qquad \text{(I)}$$

Malha β: $-100\cdot(I_2-I_1)+3-6-330\cdot I_2-100\cdot I_2+12-470\cdot I_2=0$

$$+3-6+12-1000\cdot I_2+100\cdot I_1=0$$

$$100\cdot I_1-1000\cdot I_2=-9 \qquad \text{(II)}$$

Montando o sistema de equações, temos:

$$-300\cdot I_1+100\cdot I_2=6 \qquad \text{(I)}$$

$$100\cdot I_1-1000\cdot I_2=-9 \qquad \text{(II)}$$

Multiplicando a equação (I) por 10, temos:

$$-3000 \cdot I_1 + 1000 \cdot I_2 = 60$$

$$100 \cdot I_1 - 1000 \cdot I_2 = -9$$

Somando as duas equações, temos:

$$\begin{array}{r} -3000 \cdot I_1 + 1000 \cdot I_2 = 60 \\ 100 \cdot I_1 - 1000 \cdot I_2 = -9 \quad + \\ \hline -2900 \cdot I_1 \qquad\qquad = 51 \end{array}$$

em que: $$I_1 = \frac{51}{-2900} \qquad I_1 = -17{,}6\text{mA}$$

O sinal negativo na resposta indica que o sentido correto da corrente I_1 é contrário ao adotado, estando o seu valor numérico correto.

Para calcular a corrente I_2, vamos substituir o valor de I_1 na equação (II), levando em consideração o sinal negativo, pois as equações foram montadas de acordo com os sentidos de correntes adotados.

$$100 \cdot I_1 - 1000 \cdot I_2 = -9$$

$$100 \cdot \left(-17{,}6 \times 10^{-3}\right) - 1000 \cdot I_2 = -9$$

$$-1{,}76 - 1000 \cdot I_2 = -9$$

$$I_2 = \frac{-9 + 1{,}76}{-1000} \qquad I_2 = 7{,}24\text{mA}$$

Como I_2 é um valor positivo, significa que o sentido adotado está correto.

Para calcular a corrente no ramo central, utilizamos a 1ª lei de Kirchhoff no nó A, como mostra a Figura 13.4.

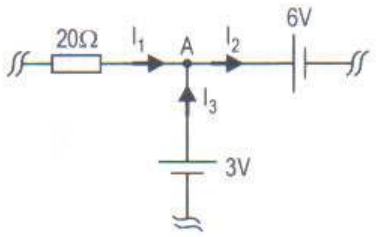


Figura 13.4 - Aplicação da 1ª lei de Kirchhoff no nó A.

$$I_1 + I_3 = I_2 \qquad I_3 = I_2 - I_1$$

$$I_3 = 7{,}24 \cdot 10^{-3} - \left(-17{,}6 \cdot 10^{-3}\right)$$

$$I_3 = 24{,}84\text{mA}$$

Da mesma forma, observando o sinal de I_3, seu sentido coincide com o adotado.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Pilhas: 1,5V (três).
- Resistores: 820Ω, 1KΩ e 2,2KΩ.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 13.5.

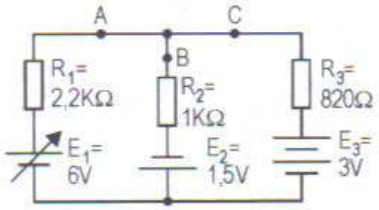


Figura 13.5

2) Meça e anote no Quadro 13.1 a tensão em cada elemento do circuito.

E_1	E_2	E_3	V_{R1}	V_{R2}	V_{R3}

Quadro 13.1

3) Meça e anote no Quadro 13.2 a corrente em cada ramo.

Ramo A	Ramo B	Ramo C

Quadro 13.2

1) A partir de um nó do circuito experimental, comprove a 1ª lei de Kirchhoff.

2) A partir de uma malha do circuito experimental, comprove a 2ª lei de Kirchhoff.

3) Determinar a corrente em cada ramo do circuito da Figura 13.6.

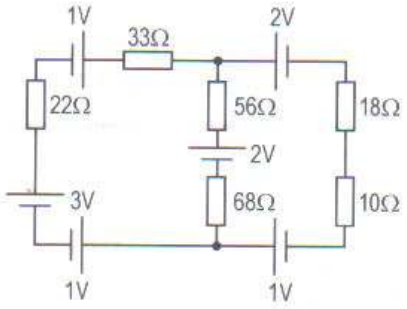


Figura 13.6

4) Determinar a leitura dos instrumentos indicados na Figura 13.7 e suas polaridades.

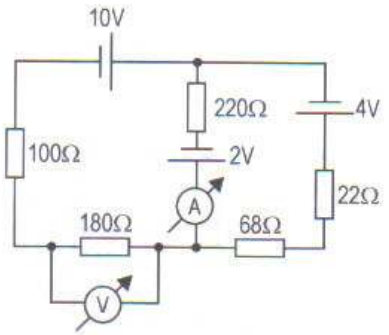


Figura 13.7

EXPERIÊNCIA

14

Teorema de Thévenin

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o teorema de Thévenin.

Teoria

Todo circuito composto por elementos lineares pode ser substituído por um gerador de força eletromotriz E_{Th} em série com uma resistência R_{Th}, constituindo o **gerador equivalente de Thévenin**, visto na Figura 14.1.

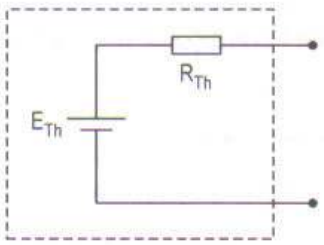


Figura 14.1 - Gerador equivalente de Thévenin.

Neste gerador, a f.e.m. E_{Th} corresponde à tensão entre dois pontos de um elemento específico, retirado do circuito, e a resistência interna do gerador de Thévenin R_{Th} corresponde à resistência equivalente entre as mesmas partes, considerando as fontes de tensão curto-circuitadas.

Para exemplificar, consideremos o circuito da Figura 14.2, no qual determinamos a corrente e a tensão no resistor $R_5 = 910\Omega$, utilizando o gerador equivalente de Thévenin.

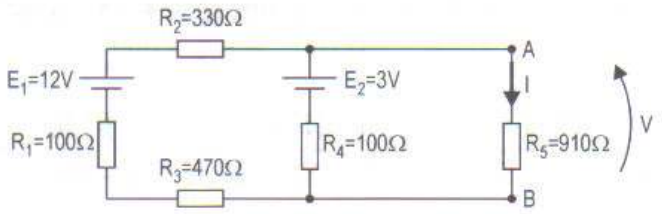


Figura 14.2 - Circuito elétrico.

Para determinar o gerador equivalente de Thévenin, devemos retirar o resistor R_5, deixando os pontos A e B em aberto. A tensão E_{Th} será a tensão entre os pontos A e B. O circuito, nestas condições, é mostrado na Figura 14.3.

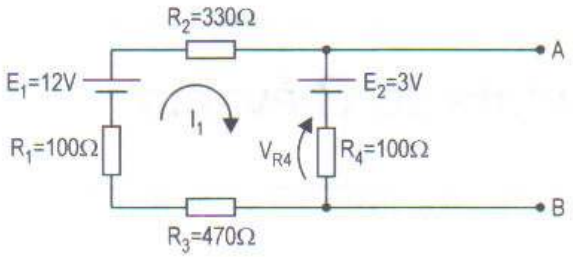


Figura 14.3 - Circuito elétrico com os pontos A e B em aberto.

Para calcular a corrente na malha, aplicaremos as leis de Kirchhoff:

$$12 - 330 \cdot I_1 - 3 - 100 \cdot I_1 - 470 \cdot I_1 - 100 \cdot I_1 = 0$$

$$9 - 1000 \cdot I_1 = 0 \;\therefore\; I_1 = 9mA$$

A tensão entre os pontos A e B é a soma das tensões E_2 e V_{R4}. Portanto, podemos escrever que:

$$E_{Th} = E_2 + V_{R4} \quad \text{ou} \quad E_{Th} = 3 + 100 \cdot 9 \cdot 10^{-3} = 3{,}9V$$

A resistência R_{Th} será obtida considerando as fontes E_1 e E_2 curto-circuitadas como a resistência equivalente entre os pontos A e B. O circuito, nestas condições, é o da Figura 14.4.

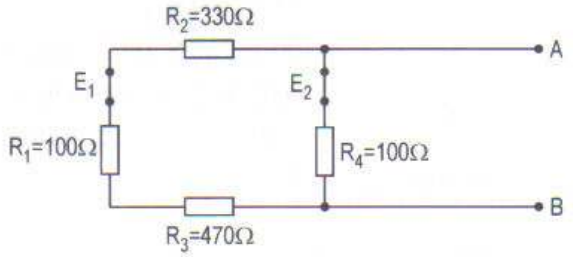


Figura 14.4 - Circuito elétrico com as fontes E_1 e E_2 curto-circuitadas.

A Figura 14.4 mostra R_1, R_2 e R_3 associados em série e em paralelo com R_4. Podemos escrever que:

$$R_{Th} = \frac{(R_1 + R_2 + R_3) \cdot R_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} \qquad R_{Th} = \frac{(100 + 330 + 470) \cdot 100}{100 + 330 + 470 + 100} \qquad R_{Th} = 90\Omega$$

Podemos agora representar o gerador equivalente de Thévenin com os valores obtidos, conforme mostra a Figura 14.5.

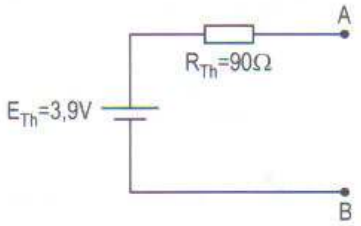


Figura 14.5 - Gerador equivalente de Thévenin.

Para calcular a corrente e a tensão no resistor R_5 = 910Ω, devemos conectá-lo entre os pontos A e B do gerador equivalente de Thévenin, servindo como carga deste. Essa situação é vista na Figura 14.6.

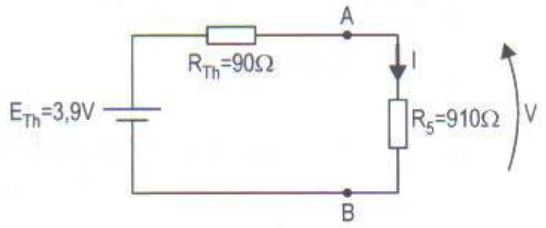


Figura 14.6 - Gerador equivalente com a carga conectada.

Aplicando a lei de Ohm, calculamos os parâmetros desejados:

$$I = \frac{3,9}{90+910} = 3,9\text{mA} \qquad V = 910 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} = 3,55\text{V}$$

Esse método pode ser repetido para qualquer outro elemento do mesmo circuito a ser considerado igualmente, e o gerador equivalente de Thévenin obtido terá outros parâmetros em função da nova situação.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 120Ω, 270Ω, 390Ω e 470Ω.
- Década resistiva.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 14.7. Meça e anote no Quadro 14.1 a corrente e a tensão no resistor de 470Ω.

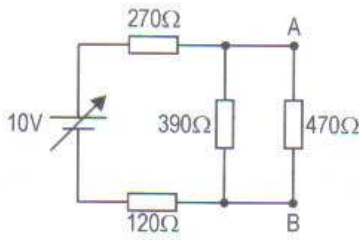


Figura 14.7

R	I	V
470Ω		

Quadro 14.1

2) Retire o resistor de 470Ω. Meça e anote no Quadro 14.2 a tensão E_{Th} entre os pontos A e B.

E_{Th}	

Quadro 14.2

3) Substitua a fonte por um curto-circuito. Meça com o ohmímetro e anote no Quadro 14.3 a resistência R_{Th} entre os mesmos pontos.

R_{Th}	

Quadro 14.3

4) Monte o circuito da Figura 14.8, ajustando a fonte e a década conforme os valores obtidos de E_{Th} e R_{Th} nos itens anteriores.

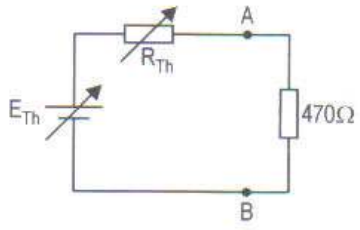


Figura 14.8

5) Meça e anote no Quadro 14.4 a corrente e a tensão no resistor de 470Ω.

R	I	V
470Ω		

Quadro 14.4

Exercícios

1) Compare os valores de V e I, obtidos no item 1 e no item 5 da experiência. O que você conclui?

2) Calcule o gerador equivalente de Thévenin entre os pontos A e B para o circuito da Figura 14.7 e compare com os valores obtidos experimentalmente.

3) Determine a tensão e a corrente no resistor de 470Ω, utilizando o gerador equivalente de Thévenin que você obteve na questão anterior.

4) Sem utilizar o gerador equivalente de Thévenin, calcule a tensão e a corrente no resistor de 470Ω, do circuito da Figura 14.7.

5) Determine a corrente e a tensão no resistor de 300Ω no circuito da Figura 14.9, utilizando o teorema de Thévenin.

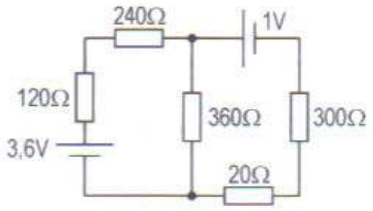


Figura 14.9

Anotações

EXPERIÊNCIA

15

Teorema de Norton

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o teorema de Norton.

Teoria

Todo circuito composto por elementos lineares pode ser substituído por um gerador de corrente I_N em paralelo com uma resistência R_N, constituindo o **gerador equivalente de Norton**, visto na Figura 15.1.

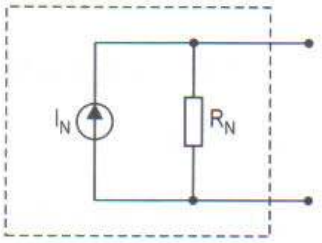


Figura 15.1 - Gerador equivalente de Norton.

Nesse gerador, a fonte de corrente I_N corresponde à corrente que circula em um curto-circuito, substituindo um elemento específico do circuito, e a resistência R_N corresponde à resistência equivalente entre os pontos do mesmo elemento, sendo este retirado do circuito, estando as fontes de tensão curto-circuitadas.

Para exemplificar, consideremos o circuito da Figura 15.2 no qual determinamos a corrente e a tensão no resistor $R_5 = 910\Omega$, utilizando o gerador equivalente de Norton.

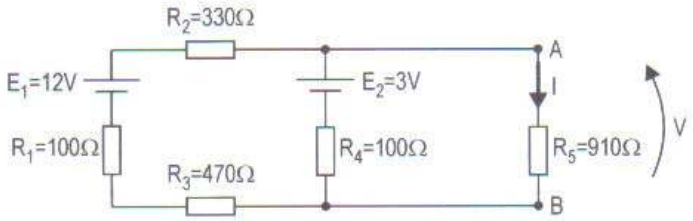


Figura 15.2 - Circuito elétrico.

Para determinar o gerador equivalente de Norton, devemos retirar o resistor R_5, substituindo por um curto-circuito. A corrente I_N é a que circulará por esse curto-circuito, ou seja, igual a I_2. O circuito, nestas condições, é mostrado na Figura 15.3.

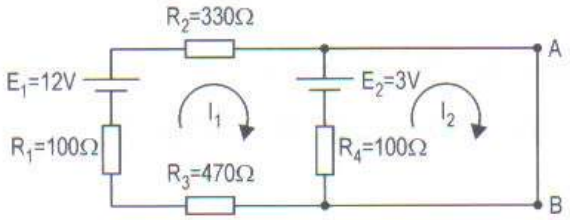


Figura 15.3 - Circuito elétrico com os pontos A e B curto-circuitados.

Para calcular essa corrente, aplicaremos as leis de Kirchhoff:

$$12-3-(330+100+470+100)\cdot I_1+100\cdot I_2=0$$

$$-1000\cdot I_1+100\cdot I_2=-9 \qquad \text{(I)}$$

$$3-100\cdot I_2+100\cdot I_1=0$$

$$100\cdot I_1-100\cdot I_2=-3 \qquad \text{(II)}$$

Resolvendo o sistema de equações, obtemos a corrente I_2 = 43,34mA, que é a corrente do gerador equivalente de Norton.

A resistência R_N é idêntica à obtida no método válido para o gerador equivalente de Thévenin, portanto $R_N = 90\Omega$.

Podemos agora representar o gerador equivalente de Norton com os valores obtidos, como indica a Figura 15.4.

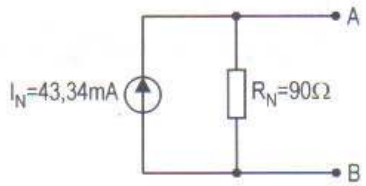


Figura 15.4 - Gerador equivalente de Norton.

Para calcular a corrente e a tensão no resistor R_5 = 910Ω, devemos conectá-lo entre os pontos A e B do gerador equivalente de Norton, servindo como carga deste. Essa situação é encontrada na Figura 15.5.

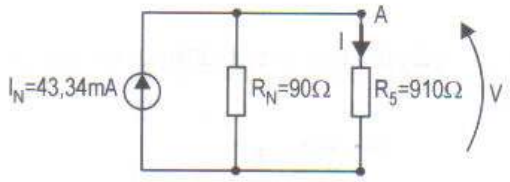


Figura 15.5 - Gerador equivalente com a carga conectada.

Aplicando a lei de Ohm, temos que:

$$V = I_N \cdot R_{eq} \qquad V = 43{,}34 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{90 \cdot 910}{90 + 910}$$

$$V = 3{,}55V \quad \therefore \quad I = \frac{3{,}55}{910} = 3{,}9mA$$

Da mesma forma que o teorema de Thévenin, esse método pode ser repetido para qualquer outro elemento do mesmo circuito a ser considerado igualmente.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 120Ω, 270Ω, 390Ω e 470Ω.
- Década resistiva.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 15.6. Meça e anote no Quadro 15.1 a corrente e a tensão no resistor de 470Ω.

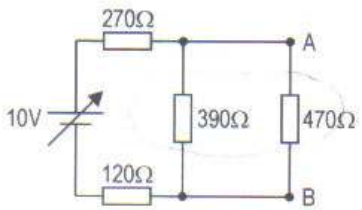


Figura 15.6

R	I	V
470Ω		

Quadro 15.1

2) Retire o resistor de 470Ω, substituindo-o por um curto-circuito. Meça e anote no Quadro 15.2 a corrente nesse fio.

I_N	

Quadro 15.2

3) Volte a abrir os pontos A e B e substitua a fonte por um curto-circuito. Meça e anote no Quadro 15.3 a resistência R_N entre os mesmos pontos.

R_N	

Quadro 15.3

4) Coloque a fonte para uma saída igual a zero volt. Monte o circuito da Figura 15.7 com década ajustada para o valor de R_N, obtido no item 3.

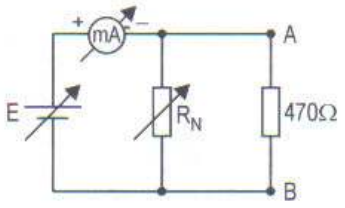


Figura 15.7

5) Ajuste a tensão E de maneira que o miliamperímetro indique o valor I_N obtido no item 2.

6) Meça e anote no Quadro 15.4 a corrente e a tensão no resistor de 470Ω.

R	I	V
470Ω		

Quadro 15.4

1) Compare os valores de V e I obtidos no item 1 e no item 6 da experiência. O que você conclui?

2) Calcule o gerador equivalente de Norton entre os pontos A e B para o circuito da Figura 15.6 e compare com os valores obtidos experimentalmente.

3) Determine a tensão e a corrente no resistor de 470Ω, utilizando o gerador equivalente de Norton que você obteve na questão anterior.

4) Determine a corrente e a tensão no resistor de 300Ω no circuito da Figura 15.8, utilizando o teorema de Norton.

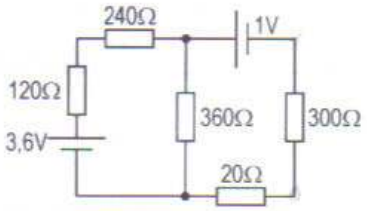


Figura 15.8

5) Determine a tensão e a corrente no resistor de 1,5KΩ no circuito da Figura 15.9, utilizando o teorema de Norton.

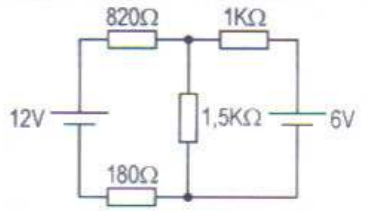


Figura 15.9

Anotações

EXPERIÊNCIA

16

Teorema da Superposição

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o teorema da superposição.

Teoria

O teorema da superposição enuncia que a corrente que circula por um ramo de um circuito com várias fontes é igual à soma algébrica das correntes, considerando uma fonte de cada vez, curto-circuitando as demais.

Utilizando essa definição, podemos usar o teorema da superposição para calcular a corrente num ramo de um circuito qualquer, considerando os efeitos parciais produzidos por cada fonte nesse ramo.

Para exemplificar, vamos calcular a corrente no ramo central do circuito da Figura 16.1.

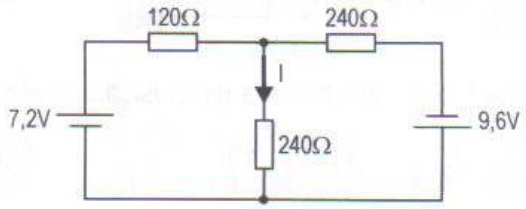


Figura 16.1 - Circuito elétrico.

Aplicando o teorema da superposição, consideraremos uma fonte de cada vez e nestas situações, vamos calcular cada parcela de corrente no ramo:

a) Cálculo da corrente I_1 relativa à fonte de 7,2V.

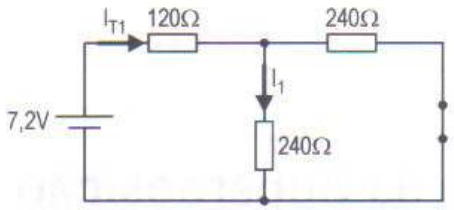


Figura 16.1a

$$R_{eq1} = 120 + \frac{240 \cdot 240}{240 + 240} \qquad R_{eq1} = 240\Omega$$

$$I_{T1} = \frac{7,2}{240} = 30mA \qquad I_1 = \frac{7,2 - 120 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{240} = 15mA$$

b) Cálculo da corrente I_2 relativa à fonte de 9,6V.

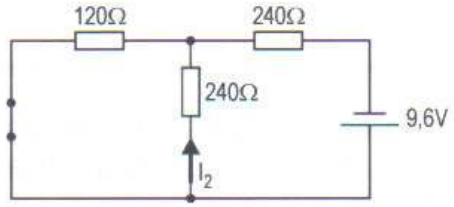


Figura 16.1b

$$R_{eq2} = \frac{120 \cdot 240}{120 + 240} + 240 \qquad R_{eq2} = 320\Omega$$

$$I_{T2} = \frac{9,6}{320} = 30mA \qquad I_2 = \frac{9,6 - 240 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{240} = 10mA$$

c) Cálculo da corrente I, considerando a superposição de efeitos.

$$I = I_1 - I_2 \qquad I = 15 - 10 \qquad \therefore \qquad I = 5mA$$

Observação: *A corrente I_2 tem sentido oposto ao da corrente I_1, portanto considerou-se essa corrente com sinal negativo, enquanto I_1 com sinal positivo. Se as duas correntes tivessem o mesmo sentido, seriam simplesmente somadas.*

- Fonte variável.
- Resistores: 470Ω, 1KΩ e 2,2KΩ.
- Pilhas: 1,5V (duas).
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 16.2. Meça e anote no Quadro 16.1 a corrente no resistor de 1KΩ.

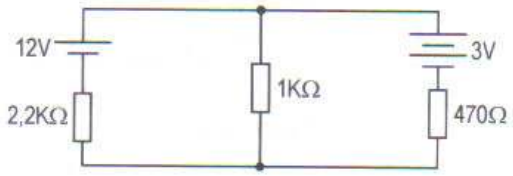


Figura 16.2

I	

Quadro 16.1

2) Substitua a fonte de 12V por um curto-circuito. Meça e anote no Quadro 16.2 a corrente no resistor de 1KΩ.

I_1	

Quadro 16.2

3) Coloque novamente a fonte de 12V no circuito, substituindo a fonte de 3V por um curto-circuito. Meça e anote no Quadro 16.3 a corrente no resistor de 1KΩ.

I_2	

Quadro 16.3

1) Com os valores obtidos nos itens 2 e 3, aplique o teorema da superposição e compare o valor obtido com o medido no item 1.

2) Calcule a corrente I, utilizando o teorema da superposição, comparando-a com a medida no item 1.

3) Determine o valor da corrente indicada pelo miliamperímetro da Figura 16.3, usando o teorema da superposição.

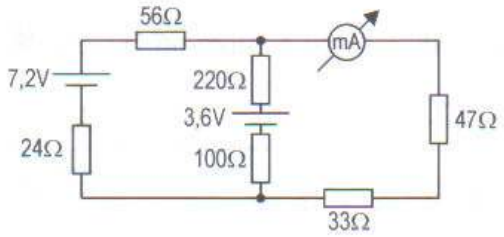


Figura 16.3

4) Utilizando o teorema da superposição, determine a corrente I, indicada na Figura 16.4.

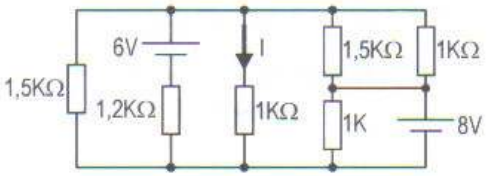


Figura 16.4

EXPERIÊNCIA

17

Ponte de Wheatstone

Objetivos

- Verificar, experimentalmente, a ponte de Wheatstone.
- Utilizar a ponte de Wheatstone para medir a resistência de um resistor de valor desconhecido.

Teoria

A ponte de Wheatstone é um circuito composto por resistores arranjados de tal forma a obter-se em um determinado ramo uma corrente nula, ou seja, situação denominada **equilíbrio da ponte**. Esse circuito é mostrado na Figura 17.1.

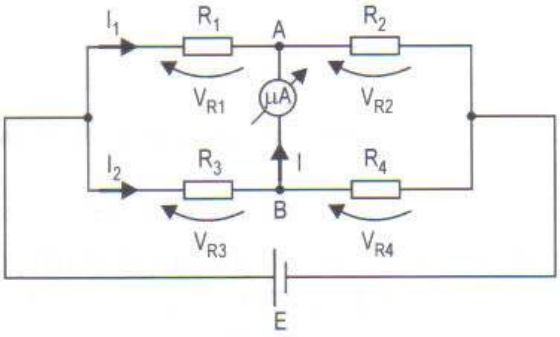


Figura 17.1 - Ponte de Wheatstone.

Para o circuito estar equilibrado, a corrente I deve ser igual a zero e para tanto a tensão V_{AB} deve ser nula. Nessas condições, temos que a corrente I_1 percorre R_1 e R_2 e a corrente I_2 percorre R_3 e R_4, pois não há deriva dessas correntes para o fio central.

Logo, podemos escrever que:

$$V_{R1} = V_{R3} \quad \text{e} \quad V_{R2} = V_{R4}$$

sendo:

$$V_{R1} = R_1 \cdot I_1$$

$$V_{R3} = R_3 \cdot I_2$$

$$V_{R2} = R_2 \cdot I_1$$

$$V_{R4} = R_4 \cdot I_2$$

substituindo, temos $R_1 \cdot I_1 = R_3 \cdot I_2$ e $R_2 \cdot I_1 = R_4 \cdot I_2$

Portanto, podemos escrever que:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$$

em que a igualdade $\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}$ é a relação entre os resistores para obter a situação de equilíbrio da ponte.

Uma das aplicações da ponte de Wheatstone é a medida de resistência com grande precisão. Para tanto, montamos o circuito indicado na Figura 17.2.

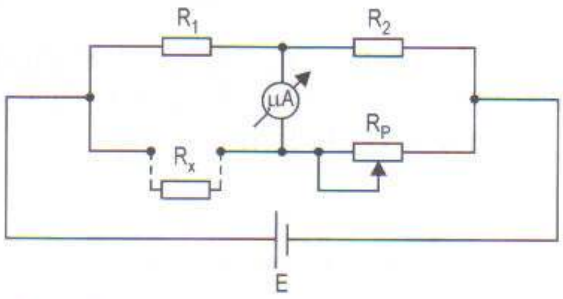


Figura 17.2 - Ponte de Wheatstone para medida de resistência.

No circuito observamos que o resistor desconhecido (R_x) é colocado entre dois pontos num dos braços da ponte, enquanto no outro braço colocamos um potenciômetro para ajustar a situação de equilíbrio da ponte, ou seja, ajustamos o valor da corrente do microamperímetro para zero. Feito isso, aplicamos a relação $R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_p$, em que conhecendo os valores de R_1, R_2 e R_p, determina-se o valor de R_x.

Para melhor desempenho prático, convém utilizar no lugar de R_p uma década resistiva, sendo ela e os resistores R_1 e R_2 responsáveis pela precisão da medida, pois quanto mais precisos forem, maior a precisão da medida do elemento desconhecido.

Podemos também, escolhendo convenientemente os valores de R_1 e R_2, obter o valor do resistor desconhecido, multiplicando o valor lido na década resistiva pela relação entre R_1 e R_2. Para exemplificar essa situação, consideremos o circuito da Figura 17.3, cujo equilíbrio temos:

$$R_x = \frac{10}{100} \cdot R_{Dec}$$

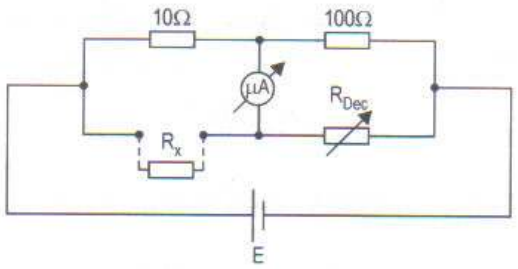


Figura 17.3 - Ponte de Wheatestone para medir valores baixos de resistores.

em que a relação $\frac{10}{100}$ constitui fator igual a 0,1, que multiplicado por R_{Dec} possibilita medir valores de R_x pequenos. Admitindo que a década possibilite ajustes na faixa de 0 a 100Ω, conseguimos medir resistores de 0 a 10Ω. Se diminuirmos esse fator, conseguiremos medir valores de resistências mais baixas com grande precisão, fato impossível com um ohmímetro convencional.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 100Ω, 150Ω, 330Ω e cinco valores desconhecidos.
- Multímetro.
- Década resistiva.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 17.4. Ajuste a década para o equilíbrio da ponte.

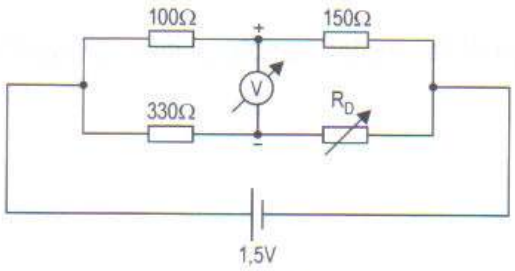


Figura 17.4

Observação: *Para fins de segurança, sugerimos utilizar um voltímetro que deve ser conectado após a montagem completa do circuito, numa escala apropriada, sendo sucessivamente abaixada para melhor sensibilidade na ponte.*

2) Meça e anote no Quadro 17.1 as tensões nos resistores e na década.

R	100Ω	150Ω	330Ω	R_{Dec}
V				

Quadro 17.1

3) Monte o circuito da Figura 17.5 para medida de resistências.

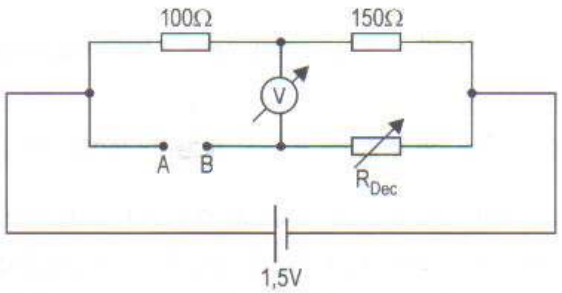


Figura 17.5

4) Conecte entre os pontos A e B cinco resistores de valores desconhecidos. Ajuste o equilíbrio da ponte para cada resistor e anote o valor ajustado de R_{Dec} no Quadro 17.2.

	R_{Dec}	R_x	R_{Ohm}
R_1			
R_2			
R_3			
R_4			
R_5			

Quadro 17.2

5) Com o ohmímetro meça cada resistor e anote o valor no Quadro 17.2.

1) Calcule o valor de R_{Dec} para obter o equilíbrio da ponte para o circuito da Figura 17.4.

2) Com o valor obtido na questão anterior, calcule as tensões em cada resistor e na década. Compare com os valores obtidos no item 2.

3) Determine o valor de R_x para cada caso do item 4, anotando os resultados no Quadro 17.2.

4) Compare os valores obtidos no exercício anterior com os valores medidos com o ohmímetro constante no quadro.

5) Por que utilizamos, na ponte de Wheatstone, um microamperímetro e não um miliamperímetro?

6) Calcule R_x para a Figura 17.6, sabendo que a ponte está no equilíbrio e o cursor do potenciômetro está no ponto médio.

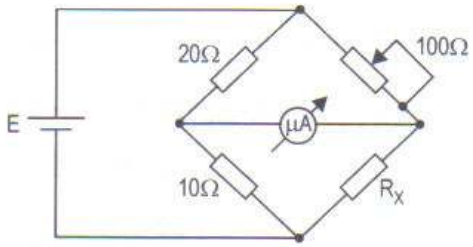


Figura 17.6

7) Estando a ponte no equilíbrio, determine R_x, V_{AB}, V_{DC}, V_{R3} e I_1 para a Figura 17.7.

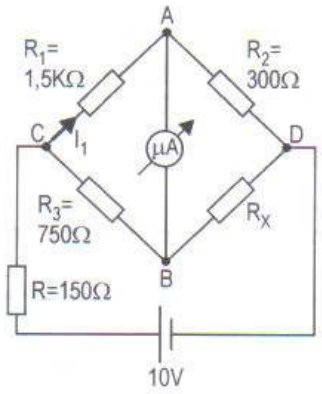


Figura 17.7

Anotações

EXPERIÊNCIA

18

Bipolos Não Ôhmicos

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, as características dos bipolos não ôhmicos.

Teoria

Denomina-se bipolo todo elemento que possui dois terminais. Como exemplo temos o resistor que é um bipolo ôhmico, ou seja, obedece à lei de Ohm.

O bipolo não ôhmico é aquele cuja característica não é linear, portanto possui uma resistência que varia de acordo com o ponto de trabalho. A Figura 18.1 mostra a característica de um bipolo não ôhmico, no qual se observa atenuação do aumento da corrente para um aumento da tensão, caracterizando a não linearidade.

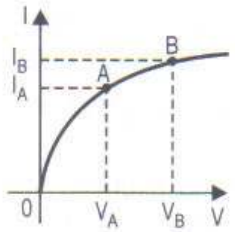


Figura 18.1 - Curva característica de um bipolo não ôhmico.

Como os bipolos não ôhmicos apresentam resistências diferentes a cada ponto de trabalho, devemos determiná-la ponto a ponto, sendo, somente nestes casos, válida a lei de Ohm. Calculando a resistência no ponto A e no ponto B da Figura 18.1, temos respectivamente:

$$R_A = \frac{V_A}{I_A} \quad \text{e} \quad R_B = \frac{V_B}{I_B}$$

sendo R_A diferente de R_B.

Num circuito podemos ter bipolos ôhmicos associados aos não ôhmicos. Para determinar as correntes e tensões resultantes da associação, podemos utilizar o método analítico ou o método gráfico. Devido à complexidade matemática do método analítico, vamos optar pelo método gráfico, utilizando a reta de carga do circuito. O método consiste em traçar a reta de carga sobre a característica do bipolo não ôhmico e obter, por meio do ponto de intersecção, o ponto de trabalho do bipolo no circuito.

Associando um resistor e um bipolo não ôhmico, conforme a Figura 18.2, vamos determinar a reta de carga desse circuito.

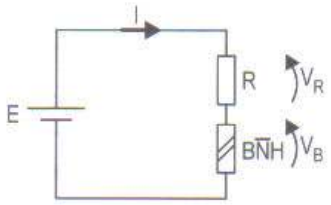


Figura 18.2 - Associação de um bipolo não ôhmico com um resistor.

Para o circuito podemos escrever:

$$E = V_R + V_B$$

sendo: $V_R = R \cdot I$ e $V_B = E - R \cdot I$

A equação $V_B = E - R \cdot I$ é linear, isto é, podemos representá-la graficamente por uma reta, denominada reta de carga. Para tanto, precisamos determinar quaisquer dois pontos da reta. Por exemplo, fazendo I = 0, temos V_B = E (1º ponto da reta) e fazendo V_B = 0, temos $I = \frac{E}{R}$ (2º ponto da reta).

Transpondo esses dois pontos para a característica do bipolo, visto na Figura 18.3, e unindo-os, teremos a reta cruzando com a característica, determinando, assim, o ponto de trabalho do circuito, também denominado ponto quiescente (Q).

A partir do ponto Q da Figura 18.3 determinamos o valor da corrente de trabalho (I_Q) e da tensão de trabalho (V_Q) do bipolo não ôhmico.

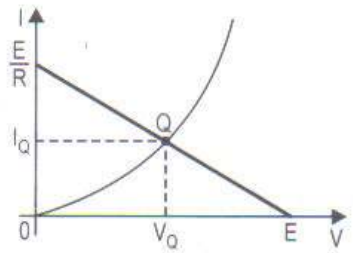


Figura 18.3 - Determinação do ponto de trabalho de um bipolo não ôhmico.

Como exemplo vamos associar um resistor a um bipolo não ôhmico, alimentado com uma tensão, conforme mostra a Figura 18.4, e determinar a tensão e a corrente em cada componente do circuito.

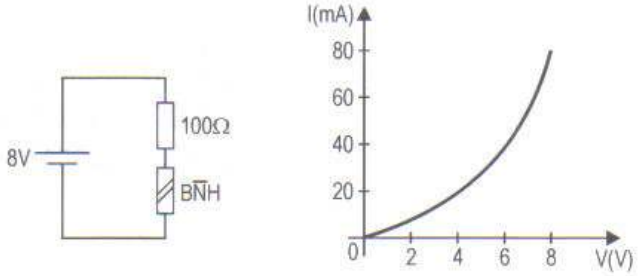


Figura 18.4 - Circuito elétrico com um bipolo não ôhmico e sua característica.

Do circuito temos:

$$8 = 100 \cdot I + V \quad \text{em que} \quad V = 8 - 100 \cdot I$$

Determinando dois pontos da reta, temos:

1º ponto: $I = 0 \rightarrow V = 8$ **2º ponto:** $V = 0 \rightarrow I = \frac{8}{100} = 80mA$

Colocando esses dois pontos na curva, podemos traçar a reta de carga, conforme mostra a Figura 18.5.

Da Figura 18.5 obtemos o valor da corrente no circuito série e da tensão no bipolo:

$I_Q = 30mA$ $V_Q = 5V$

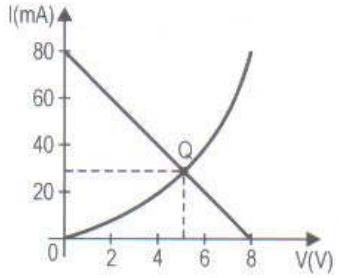


Figura 18.5 - Representação da reta de carga sobre a curva característica do bipolo não ôhmico.

A tensão no resistor pode ser obtida fazendo:

$$V_R = E - V_Q \qquad V_R = 8 - 5 \therefore V_R = 3V$$

ou

$$V_R = R \cdot I \qquad V_R = 100 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \therefore V_R = 3V$$

Material Experimental

- Fonte variável.
- Lâmpada: 12V/40mA.
- Resistor: 220Ω.
- Multímetro.

Simbologia

Bipolo Não Ôhmico	BNH

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 18.6.

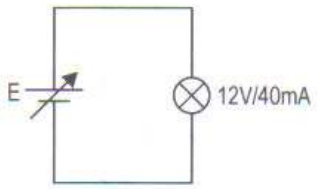


Figura 18.6

2) Ajuste a tensão da fonte de acordo com o Quadro 18.1. Meça e anote o valor da corrente para cada valor de tensão ajustado.

V(V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I(mA)													

Quadro 18.1

3) Monte o circuito da Figura 18.7.

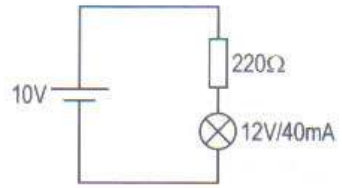


Figura 18.7

4) Meça e anote no Quadro 18.2 a corrente no circuito, a tensão no resistor e a tensão no bipolo.

	Resistor	Bipolo
I(mA)		
V(V)		

Quadro 18.2

Exercícios

1) Com os valores obtidos no Quadro 18.1, construa a curva característica do bipolo não ôhmico, I = f(V).

2) Trace a reta de carga do circuito da Figura 18.7, utilizando a curva obtida no exercício anterior. Determine o ponto de trabalho do bipolo e compare com os valores obtidos no item 4.

3) Determine para o circuito da Figura 18.8 o ponto de trabalho do bipolo não ôhmico, dada a sua curva característica.

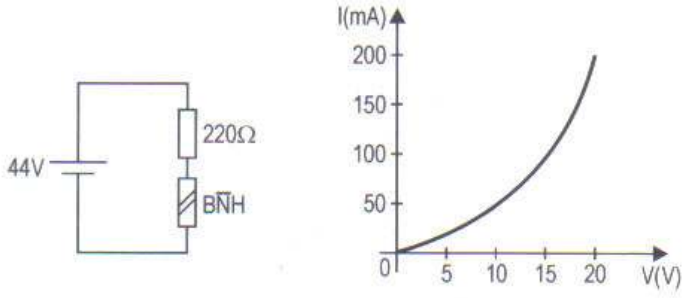


Figura 18.8

EXPERIÊNCIA

19

Resistência Interna de um Galvanômetro

Objetivo

- Determinar, experimentalmente, a resistência interna de um medidor de corrente.

Teoria

Galvanômetro é um instrumento básico utilizado em medições de corrente contínua. Destacamos o instrumento de bobina móvel, que consiste numa parte fixa, o ímã permanente, gerando um campo magnético intenso, e uma parte móvel composta por uma bobina, ou seja, um enrolamento de um fio condutor fino, sobre um quadro de alumínio preso a um núcleo de ferro e um ponteiro, sendo todo o sistema fixado por duas molas espirais (de bronze fosforoso), dotadas de eixos suportados por mancais, que ligadas ao fio da bobina são percorridas pela corrente a ser medida.

A estrutura básica interna de um galvanômetro é vista na Figura 19.1.

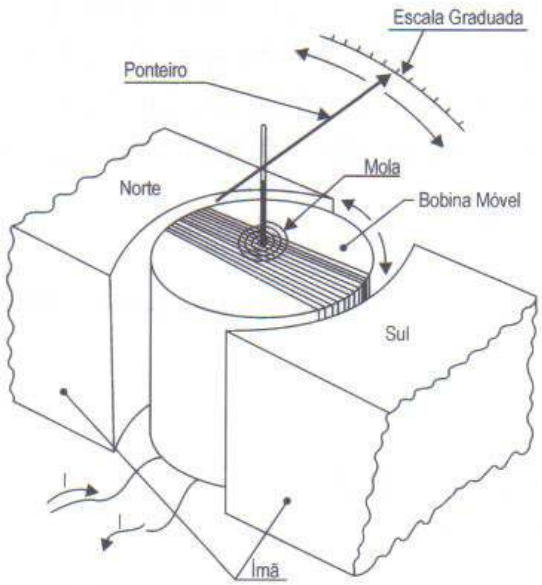


Figura 19.1 - Estrutura interna de um galvanômetro.

O seu funcionamento baseia-se no efeito eletromagnético, causado pela corrente elétrica que circula pela bobina, originando forças que, atuando sobre o sistema móvel, deflexionam o ponteiro mecanicamente unido a este. As forças de restituição, originadas pelas molas de restituição, contrabalanceiam as forças de deflexão, estabilizando o sistema, quando então temos o ponteiro imóvel sobre uma escala previamente graduada, indicando assim o valor da medida.

Um galvanômetro, ao ser utilizado para medidas em um circuito de corrente contínua, equivale a uma resistência ôhmica (R_g), que em função do valor pode alterar as características deste.

Os galvanômetros são essencialmente medidores de pequenos valores de corrente, da ordem de μA, sendo necessária uma associação conveniente de resistores, para que possam ser utilizados como amperímetros ou voltímetros em diversas escalas.

Para determinar a resistência interna (R_g) de um galvanômetro, experimentalmente, precisamos montar o circuito da Figura 19.2.

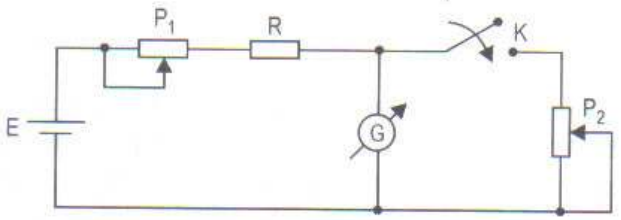


Figura 19.2 - Circuito para determinar a resistência interna do galvanômetro.

Inicialmente, com a chave K aberta, ajustamos o potenciômetro P_1 de maneira que circule pelo circuito a corrente de fundo de escala do galvanômetro. Logo após, fechamos a chave K e ajustamos o potenciômetro P_2 para que o galvanômetro indique uma corrente igual à metade do valor do seu fundo de escala. A seguir, desconectamos o potenciômetro P_2 do circuito, medindo com um ohmímetro a resistência ajustada, que será igual ao valor de R_g. Isto se deve ao fato de o galvanômetro estar em paralelo com P_2, e neste caso as correntes são iguais; então podemos concluir que os valores de resistências são iguais.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 680Ω.
- Potenciômetro: 100Ω e 1KΩ/LIN.
- Miliamperímetro: 0-1mA.b.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 19.3.

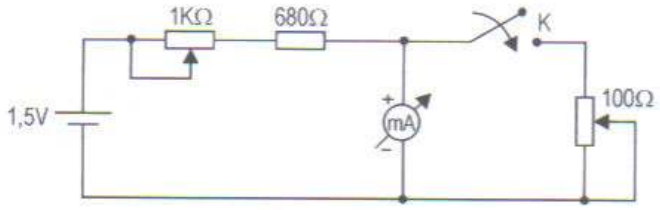


Figura 19.3

2) Com a chave K aberta, ajuste o potenciômetro de 1KΩ de modo que a corrente atinja o fundo de escala do medidor.

3) Sem mexer no potenciômetro de 1KΩ, ligue a chave K e ajuste o potenciômetro de 100Ω, para que o ponteiro do medidor atinja o ponto médio da escala.

4) Desligue a chave K e sem mexer no cursor do potenciômetro de 100Ω, meça a resistência ajustada com o ohmímetro, anotando o seu valor no Quadro 19.1.

R_g	

Quadro 19.1

Exercícios

1) No circuito da Figura 19.3, qual é a função do resistor de 680Ω?

2) Podemos utilizar o mesmo circuito da Figura 19.3, com os mesmos valores, para determinar a resistência interna de medidores de outras faixas de corrente? Por quê?

3) Ao medir a corrente no circuito da Figura 19.4, com um miliamperímetro de 100mA, obtivemos uma indicação de 90mA. Sendo os resistores de absoluta precisão, calcule a referida corrente e explique o porquê da diferença entre a calculada e a medida.

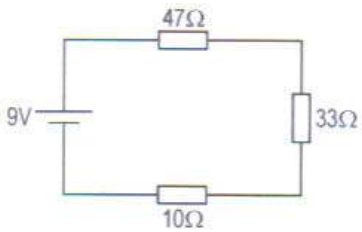


Figura 19.4

Anotações

EXPERIÊNCIA

20

Resistência Shunt em Amperímetro

Objetivo

- Verificar como um galvanômetro pode ser transformado num amperímetro para correntes maiores que do seu fundo de escala.

Teoria

Um galvanômetro, com uma corrente de fundo de escala I_g, pode ser convertido em um amperímetro com uma corrente de fundo de escala I_o, sendo I_o bem maior que I_g. Para tanto, é necessário associar ao galvanômetro um resistor em paralelo para desviar uma parte da corrente. Essa ligação é mostrada na Figura 20.1, que representa a resistência interna do galvanômetro em série com este e o resistor de desvio R_s também denominado **shunt**.

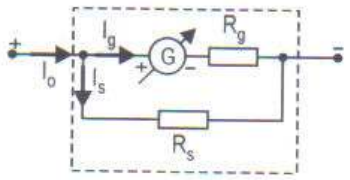


Figura 20.1 - Ligação de R_s a um galvanômetro para obter um miliamperímetro.

No circuito temos a corrente I_o, que é dividida em duas partes, uma corrente I_g, a de fundo de escala do galvanômetro original, e uma corrente I_s que é a parcela a ser desviada por meio do resistor R_s.

Como no circuito existe uma associação paralela de dois resistores, podemos escrever:

$$R_g \cdot I_g = R_s \cdot I_s$$

sendo: $I_s = I_o - I_g \quad \therefore \quad R_g \cdot I_g = R_s \cdot (I_o - I_g)$

$$R_s = \frac{R_g \cdot I_g}{I_o - I_g}$$

Com essa relação, conhecendo as especificações do galvanômetro (R_g e I_g), podemos dimensionar o valor da resistência shunt, necessária para convertê-lo em um medidor de corrente de determinada escala I_o. Para exemplificar, vamos converter um galvanômetro de 500μA e 10Ω de resistência interna em um miliamperímetro de 0-100mA, conforme a Figura 20.2.

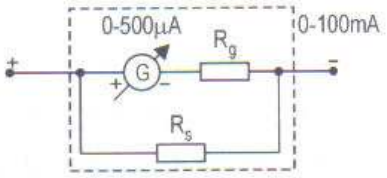


Figura 20.2 - Adaptação de um galvanômetro em um miliamperímetro.

$$R_s = \frac{10 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-3} - 500 \cdot 10^{-6}}$$

$$R_s = 0{,}05\Omega$$

Para obter o miliamperímetro de 0-100mA, associamos o resistor de 0,05Ω e a escala do galvanômetro deve ser graduada de acordo com o novo valor de fundo de escala, conforme a Figura 20.3.

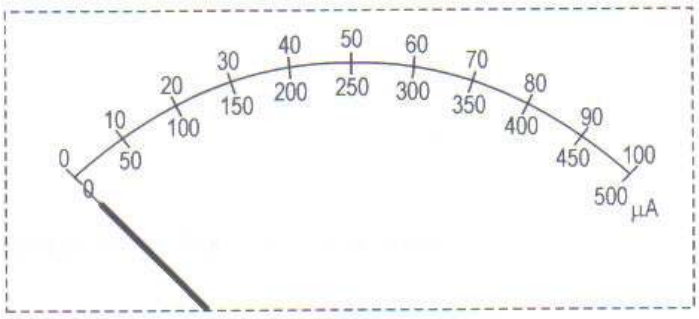


Figura 20.3 - Graduação da nova escala.

A inserção do instrumento de medida em um circuito pode acarretar uma alteração significativa neste e, consequentemente, no resultado da medida a ser efetuada. Para que essa influência seja a menor possível e desprezível, é necessário que o instrumento, em se tratando de um medidor de corrente, tenha uma resistência interna bem pequena em relação às resistências do circuito. Além disso, o próprio instrumento apresenta, devido a imperfeições construtivas e aproximações nos dimensionamentos, um erro sobre o valor real medido, determinando um valor em porcentagem denominado **classe de exatidão**.

- Fonte variável.
- Potenciômetro: 100Ω/LIN.
- Resistor: 6,8KΩ.
- Multímetro.
- Galvanômetro de 0-1mA.

Parte Prática

1) Determine o valor da resistência interna do galvanômetro de 0-1mA, conforme a experiência anterior, e anote no Quadro 20.1.

R_g	

Quadro 20.1

2) Calcule o valor de R_s para converter o galvanômetro de 0-1mA em um miliamperímetro de 0-2mA e anote no Quadro 20.2.

R_s	

Quadro 20.2

3) Monte o circuito do novo miliamperímetro, conforme a Figura 20.4, utilizando como R_s o potenciômetro de 100Ω, ajustado com o ohmímetro para o valor calculado no item 2.

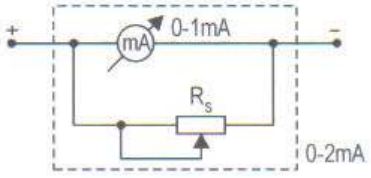


Figura 20.4

4) Monte o circuito da Figura 20.5.

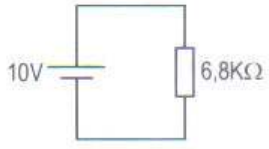


Figura 20.5

5) Com o multímetro, meça e anote no Quadro 20.3 o valor da corrente no circuito da Figura 20.5.

6) Repita a medida anterior com o miliamperímetro que você construiu, anotando o valor no Quadro 20.3.

	Multímetro	Miliamperímetro
I		

Quadro 20.3

Exercícios

1) Compare a leitura do miliamperímetro construído com a do multímetro.

2) Utilizando a escala do galvanômetro, mostre a graduação para o miliamperímetro que você construiu.

3) Calcule a resistência interna do miliamperímetro que você construiu.

4) A partir de um galvanômetro de 5mA com resistência interna 20Ω, esquematize e determine os valores de resistência Shunt para que ele, utilizando uma chave seletora, possa funcionar como um miliamperímetro de quatro escalas: 0-5mA, 0-10mA, 0-50mA e 0-100mA.

EXPERIÊNCIA

21

Resistência Multiplicadora em Voltímetro

Objetivo

- Verificar como um galvanômetro pode ser transformado num voltímetro.

Teoria

Um galvanômetro, com uma corrente de fundo de escala I_g, pode ser convertido em um voltímetro com uma tensão de fundo de escala V_o. Para tanto, é necessário adicionar ao galvanômetro um resistor em série para dividir a tensão entre o galvanômetro e esse resistor.

Essa ligação é mostrada na Figura 21.1, na qual temos representadas a resistência do galvanômetro e a resistência R_m, também denominada **resistência multiplicadora**, associadas em série, formando o voltímetro.

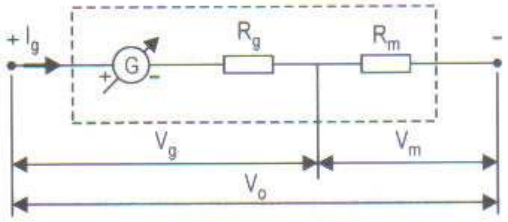


Figura 21.1 - Ligação de R_m a um galvanômetro para obter um voltímetro.

No circuito, existe a tensão V_o dividida em duas partes, sendo uma relativa à queda de tensão no galvanômetro (V_g) e outra à queda de tensão na resistência multiplicadora V_m.

Como no circuito há uma associação série de dois resistores, e a tensão será V_o quando a corrente no galvanômetro for I_g, podemos escrever:

$$V_o = V_g + V_m$$

$$V_o = R_g \cdot I_g + R_m \cdot I_g \rightarrow R_m \cdot I_g = V_o - R_g \cdot I_g$$

$$R_m = \frac{V_o - R_g \cdot I_g}{I_g} \rightarrow R_m = \frac{V_o}{I_g} - R_g$$

Com esta relação, conhecendo as especificações do galvanômetro (R_g e I_g), podemos dimensionar o valor da resistência multiplicadora, necessária para convertê-lo em um voltímetro de determinada escala V_o.

Para exemplificar, vamos converter um galvanômetro de 500μA e 10Ω de resistência interna em um voltímetro de 0-10V, conforme a Figura 21.2.

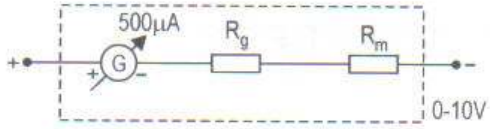


Figura 21.2 - Adaptação de um galvanômetro em um voltímetro.

$$R_m = \frac{10}{500 \cdot 10^{-6}} - 10 \qquad R_m = 19.990\Omega$$

Para obter o voltímetro de 0-10V, associamos o resistor de 19.990Ω em série com o galvanômetro, com escala graduada, de acordo com o novo valor e unidade de fundo de escala, de acordo com a Figura 21.3.

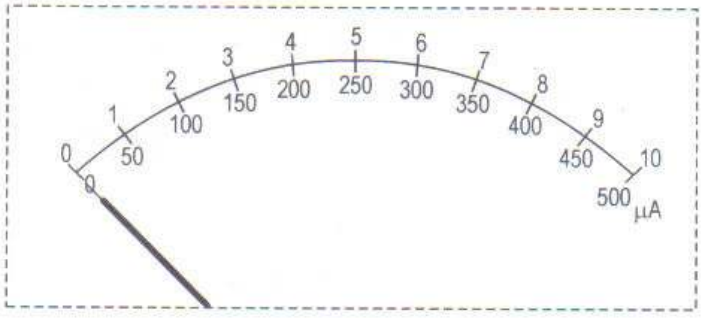


Figura 21.3 - Graduação da nova escala.

A medida de tensão em um circuito pode acarretar uma alteração nele e, consequentemente, no valor medido. Para que essa influência seja a menor possível e desprezível, é necessário que o voltímetro tenha uma resistência interna bem alta em relação às do circuito. Para avaliar essa influência, devemos levar em consideração a **sensibilidade do voltímetro**, que é a relação entre a resistência total do instrumento e a tensão de fundo de escala:

$$S_v = \frac{R}{V_o} \quad \frac{[\Omega]}{[V]}$$

sendo R a resistência total, isto é, $R = R_g + R_m$, e como $\frac{V_o}{R} = I_g$, podemos escrever que $S_v = \frac{1}{I_g}$.

A sensibilidade exprime o valor da resistência do voltímetro a cada volt medido, e quanto maior esse parâmetro, menor a influência do voltímetro na medida.

No exemplo anterior, temos um voltímetro cuja sensibilidade é:

$$S_v = \frac{I}{I_g} = \frac{1}{500 \cdot 10^{-6}} = 2000\Omega / V$$

ou

$$S_v = \frac{R}{V_o} = \frac{19990 + 10}{10} = 2000\Omega / V$$

Para um voltímetro, esse valor de sensibilidade é relativamente baixo, pois na prática encontramos valores de dezenas de KΩ/V, que representam instrumentos de maior precisão e qualidade.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 470Ω e 1KΩ.
- Década resistiva.
- Multímetro.
- Galvanômetro de 0-1mA.

Parte Prática

1) Utilizando o galvanômetro da experiência anterior, calcule o valor de R_m para convertê-lo em um voltímetro de 0-15V e anote no Quadro 21.1.

R_m	

Quadro 21.1

2) Monte o circuito do voltímetro conforme a Figura 21.4, utilizando como R_m a década resistiva ajustada para o valor calculado no item 1.

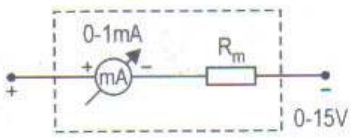


Figura 21.4

3) Monte o circuito da Figura 21.5.

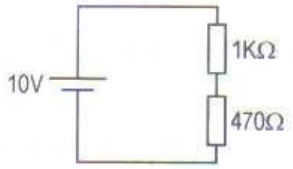


Figura 21.5

4) Com o multímetro, meça e anote no Quadro 21.2 o valor da tensão em cada resistor do circuito da Figura 21.5.

5) Repita a medida anterior com o voltímetro que você construiu.

R	$V_{multímetro}$	$V_{voltímetro}$
1KΩ		
470Ω		

Quadro 21.2

6) Repita os itens 3, 4 e 5, utilizando no circuito da Figura 21.5 os resistores de 10KΩ e 22KΩ, preenchendo o Quadro 21.3.

R	$V_{multímetro}$	$V_{voltímetro}$
10KΩ		
22KΩ		

Quadro 21.3

Exercícios

1) Compare a leitura do voltímetro construído com a do multímetro.

2) Utilizando a escala do galvanômetro, mostre a graduação para o voltímetro que você construiu.

3) Calcule a resistência interna e a sensibilidade do voltímetro que você construiu.

4) A partir de um galvanômetro de 200μA com resistência interna de 5Ω, esquematize e determine os valores de resistências multiplicadoras para que este, por meio de uma chave seletora, possa funcionar como um voltímetro de quatro escalas: 0-1V, 0-3V, 0-5V e 0-10V.

EXPERIÊNCIA

22

Ohmímetro Série

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o circuito de um ohmímetro série, bem como a graduação de sua escala.

Teoria

Para medir uma resistência, utilizando um galvanômetro com sua escala graduada em ohms, é necessário que circule uma corrente pelo elemento a ser medido, deflexionando o ponteiro proporcionalmente ao valor deste. Para tanto, necessitamos formar um circuito composto por um galvanômetro, uma fonte, elementos resistivos e o elemento desconhecido. Essa ligação pode ser série ou paralela, originando assim o **ohmímetro série** e o **ohmímetro paralelo**.

O circuito do ohmímetro série é mostrado na Figura 22.1.

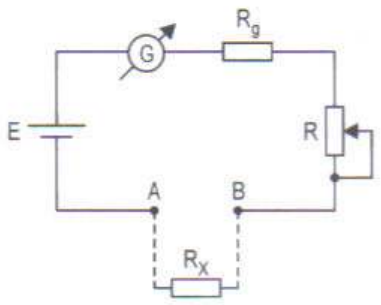


Figura 22.1 - Circuito do ohmímetro série.

Observando o circuito, notamos que o potenciômetro R serve para ajustar o **zero** Ω, isto é, a corrente de fundo de escala do galvanômetro, quando os terminais A e B, pontas de prova, estiverem curto-circuitados. Defazendo o curto-circuito, ao ligar o resistor desconhecido R_x, circulará uma corrente proporcionalmente a esse elemento. Portanto, podemos escrever:

Para $R_x = 0$

$$E = (R_g + R) I_g \quad \therefore \quad R = \frac{E}{I_g} - R_g \qquad (I)$$

Para $R_x \neq 0$

$$E = (R_g + R + R_x)\, I_x \quad \text{em que} \quad I_x < I_g$$

$$E = (R_g + R)\, I_x + R_x \cdot I_x$$

$$R_x = \frac{E}{I_x} - (R_g + R) \qquad (II)$$

Substituindo (I) em (II), temos:

$$R_x = \frac{E}{I_x} - \left[\cancel{R_g} + \left(\frac{E}{I_g} - \cancel{R_g} \right) \right]$$

$$R_x = \frac{E}{I_x} - \left[\frac{E}{I_g} \right] \quad \therefore \quad R_x = \frac{E}{I_x} - \frac{E}{I_g}$$

A relação obtida fornece o valor da resistência desconhecida em função da leitura do galvanômetro. Para melhor efeito prático, devemos graduar a escala do galvanômetro para esses valores de resistência. Vamos levantar a curva característica do ohmímetro série, determinando R_x em pontos notáveis.

Igualando as equações:

$$E = (R_g + R) I_g \rightarrow \text{obtida com AB curto-circuitado}$$

e $$E = (R_g + R + R_x) I_x \rightarrow \text{obtida com } R_x \text{ entre A e B}$$

temos: $$(R_g + R) I_g = (R_g + R + R_x) I_x$$

fazendo: $$R_g + R = R_{eq}$$

podemos escrever: $$R_{eq} \cdot I_g = (R_{eq} + R_x) I_x$$

e obtemos: $$\frac{I_x}{I_g} = \frac{R_{eq}}{R_{eq} + R_x}$$

Quando $R_x = R_{eq}$, temos $\frac{I_x}{I_g} = \frac{1}{2}$ → meio da escala

Quando $R_x = 0$, temos $\frac{I_x}{I_g} = 1$ → fundo da escala

E quando $R_x = \infty$, temos $\frac{I_x}{I_g} = 0$ → início da escala

Transpondo para esses pontos, obtemos a curva da Figura 22.2.

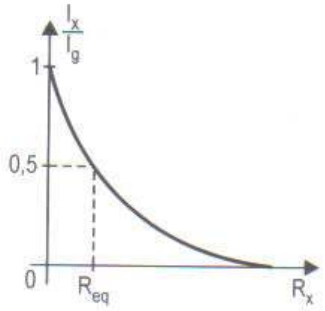


Figura 22.2 - Característica do ohmímetro série.

Observando a curva, concluímos que a variação da resistência obedece a uma escala logarítmica que, transportada para a escala do galvanômetro, resulta na graduação mostrada na Figura 22.3.

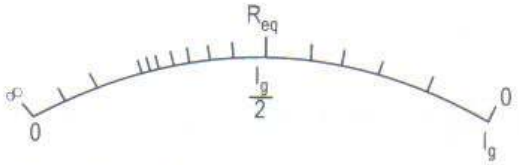


Figura 22.3 - Graduação do ohmímetro série.

Exemplificando, vamos graduar a escala de um ohmímetro série a partir do circuito da Figura 22.4.

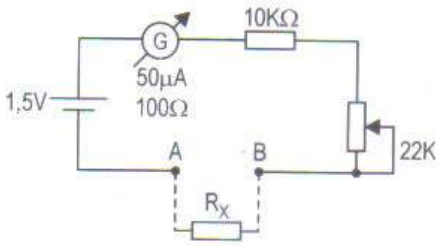


Figura 22.4 - Ohmímetro série.

Quando $R_x = 0$, temos:

$$1{,}5 = (100 + 10 \cdot 10^3 + R_p) \cdot 50 \cdot 10^{-6} \quad \therefore \quad R_p = 19{,}9K\Omega$$

$$R_{eq} = 100 + 10 \cdot 10^3 + 19{,}9 \cdot 10^3 = 30K\Omega$$

determinando a resistência em $\frac{1}{4}$ da escala do galvanômetro, isto é, em 12,5μA, temos:

$$1{,}5 = (30 \cdot 10^3 + R_x) \cdot 12{,}5 \cdot 10^{-6}, \text{ em que } R_x = 90K\Omega$$

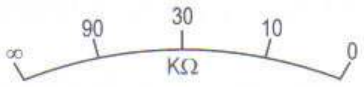
Para metade da escala, $I_x = 25\mu A$, temos:

$$1{,}5 = (30 \cdot 10^3 + R_x) \cdot 25 \cdot 10^{-6}, \text{ em que } R_x = 30K\Omega$$

Para $\frac{3}{4}$ da escala, $I_x = 37\mu A$, temos:

$$1{,}5 = (30 \cdot 10^3 + R_x) \cdot 37{,}5 \cdot 10^{-6}, \text{ em que } R_x = 10K\Omega$$

Constituindo a escala, temos:



Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 220Ω, 470Ω, 1KΩ, 1,2KΩ, 3,3KΩ e 10KΩ.
- Potenciômetro: 1KΩ/LIN.
- Galvanômetro de 0-1mA.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 22.5.

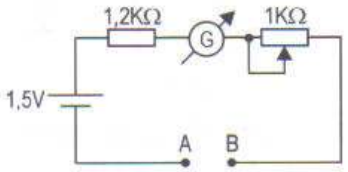


Figura 22.5

2) Curto-circuitando AB, ajuste o valor do potenciômetro para que o galvanômetro atinja o fundo da escala.

3) Conecte entre AB os resistores, conforme o Quadro 22.1. Para cada valor meça e anote o valor da corrente I_x.

R_x	I_x	$R_{xohmímetro}$	$R_{xcalculado}$
220Ω			
470Ω			
1KΩ			
3,3KΩ			
10KΩ			

Quadro 22.1

4) Meça os valores dos resistores com um ohmímetro convencional e anote no Quadro 22.1.

Exercícios

1) Calcule R_x, utilizando as correntes I_x medidas, preenchendo o Quadro 22.1. Compare os resultados com os valores medidos pelo ohmímetro.

2) Construa a curva de I_x em função de $R_{x\ calculado}$ com os valores obtidos na experiência.

3) Construa uma escala graduada em ohms para o ohmímetro experimental.

4) Um ohmímetro série é composto por um galvanômetro de 5mA com resistência interna de 20Ω, uma pilha de 1,5V, um resistor de 200Ω e um potenciômetro de 100Ω. Calcule o valor correspondente ao centro da escala.

5) A Figura 22.6 mostra um ohmímetro série, em que foi conectado entre A e B um circuito. Calcule a leitura do ohmímetro para tal situação.

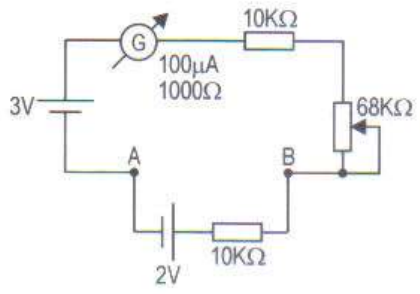


Figura 22.6

Anotações

EXPERIÊNCIA

23

Ohmímetro Paralelo

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o circuito de um ohmímetro paralelo, bem como a graduação de sua escala.

Teoria

O ohmímetro paralelo consta basicamente de uma fonte, um galvanômetro, um potenciômetro e uma chave para desligar o circuito quando não for utilizado.

O circuito do ohmímetro paralelo é mostrado na Figura 23.1.

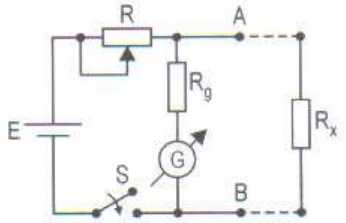


Figura 23.1 - Circuito do ohmímetro paralelo.

Observando o circuito, notamos que o potenciômetro R serve para ajustar a corrente de fundo de escala do galvanômetro ($I_{g\ máx}$), quando os terminais A e B estiverem em aberto, sendo este denominado **ajuste de infinito**.

Portanto, para $R_x = \infty$, podemos escrever:

$$E = (R + R_g) \cdot I_{g\ máx}$$

sendo:

$$I_{g\ máx} = \frac{E}{R + R_g}$$

Como R_g é bem menor que R, podemos desprezá-la, portanto:

$$I_{g\,máx} = \frac{E}{R} \qquad (I)$$

Quando conectamos entre A e B uma resistência desconhecida R_x, compomos um circuito com duas malhas, e o galvanômetro indica uma corrente I_g proporcional à parcela desviada para R_x, ou seja, à corrente I_x, conforme indica a Figura 23.2.

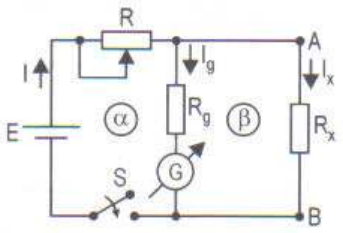


Figura 23.2 - Ohmímetro paralelo com R_x conectado.

Equacionando, temos:

$$\textbf{Malha } \alpha\text{: } E = R \cdot I + R_g \cdot I_g \qquad (II)$$

$$\textbf{Malha } \beta\text{: } R_g \cdot I_g = R_x \cdot I_x$$

em que:

$$I_x = \frac{R_g \cdot I_g}{R_x} \qquad (III)$$

e

$$I = I_g + I_x \qquad (IV)$$

substituindo (IV) em (II), temos:

$$E = R(I_g + I_x) + R_g \cdot I_g$$

ou

$$E = R \cdot I_x + (R + R_g) \cdot I_g \qquad (V)$$

substituindo (III) em (V), temos:

$$E = R \cdot \frac{R_g \cdot I_g}{R_x} + (R + R_g) \cdot I_g$$

que resulta em:

$$R_x = \frac{R \cdot R_g \cdot I_g}{E - (R + R_g) \cdot I_g}$$

dividindo numerador e denominador por $(R + R_g)$, temos:

$$R_x = \frac{\frac{R \cdot R_g \cdot I_g}{R + R_g}}{\frac{E}{R + R_g} - \frac{(R + R_g) I_g}{(R + R_g)}}$$

Como R_g é bem menor que R e $I_{g\,máx} = \frac{E}{R}$, podemos escrever que:

$$R_x = \frac{R_g \cdot I_g}{I_{g\,máx} - I_g}$$

A relação obtida fornece o valor da resistência desconhecida em função da leitura do galvanômetro, que deve ser graduado conforme esses valores. Para levantar a curva característica do ohmímetro paralelo, vamos determinar R_x em pontos notáveis.

Quando $I_g = 0$, temos $R_x = 0$; para $I_g = I_{g\,máx}$, $R_x = \infty$, e quando $I_g = \frac{I_{g\,máx}}{2}$, $R_x = R_g$.

Transpondo esses pontos, obtemos a curva da Figura 23.3.

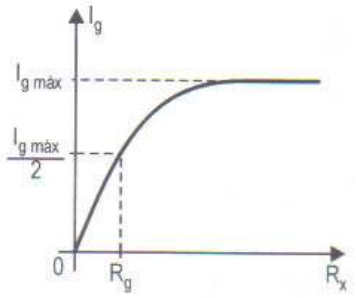


Figura 23.3 - Característica do ohmímetro paralelo.

Por meio da curva característica concluímos que a variação da resistência é logarítmica, e transposta para a escala do galvanômetro, resulta na graduação exibida na Figura 23.4.

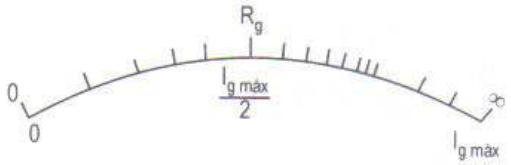


Figura 23.4 - Graduação do ohmímetro paralelo.

Exemplificando, vamos graduar a escala de um ohmímetro paralelo a partir do circuito da Figura 23.5.

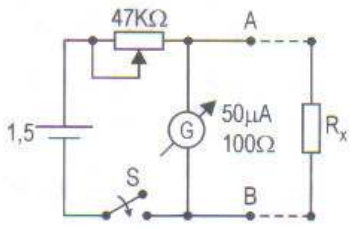


Figura 23.5 - Ohmímetro paralelo.

Quando os terminais A e B estiverem em aberto, temos:

$$1{,}5 = (R_p + 100) \cdot 50 \cdot 10^{-6} \quad \therefore \quad R_p = 29{,}9K\Omega$$

Portanto, devemos ajustar o potenciômetro em 29,9KΩ para obter o fundo de escala do galvanômetro.

Determinando a resistência em:

$\frac{1}{4}$ da escala do galvanômetro (I_g = 12,5μA)

$$R_x = \frac{100 \cdot 12{,}5 \cdot 10^{-6}}{(50 - 12{,}5) \cdot 10^{-6}} \quad \therefore \quad R_x = 33{,}34\Omega$$

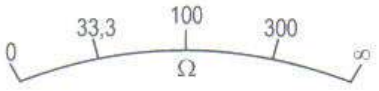
$\frac{1}{2}$ da escala do galvanômetro (I_g = 25μA)

$$R_x = \frac{100 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{(50 - 25) \cdot 10^{-6}} \quad \therefore \quad R_x = 100\Omega$$

$\frac{3}{4}$ da escala do galvanômetro (I_g = 37,5μA)

$$R_x = \frac{100 \cdot 37{,}5 \cdot 10^{-6}}{(50 - 37{,}5) \cdot 10^{-6}} \quad \therefore \quad R_x = 300\Omega$$

Construindo a escala, temos:



- Fonte variável.
- Resistores: 47Ω, 100Ω, 220Ω, 330Ω, 470Ω e 1,2KΩ.
- Potenciômetro: 1KΩ/LIN.
- Galvanômetro de 0-1mA.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 23.6.

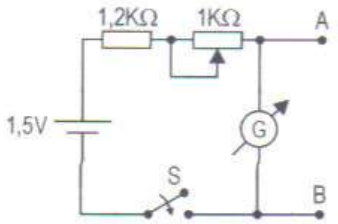


Figura 23.6

2) Feche a chave S e com os terminais A e B em aberto ajuste a corrente de fundo de escala do galvanômetro por meio do potenciômetro.

3) Conecte entre AB os resistores, conforme o Quadro 23.1. Para cada valor meça e anote os valores da corrente I_g.

R_x	I_g	$R_{xohmimetro}$	$R_{xcalculado}$
47Ω			
100Ω			
220Ω			
330Ω			
470Ω			

Quadro 23.1

4) Meça os valores dos resistores com um ohmímetro convencional e anote no Quadro 23.1.

1) Calcule R_x, utilizando as correntes I_g medidas, preenchendo o Quadro 23.1. Compare os resultados com os valores medidos pelo ohmímetro.

2) Construa a curva I_g em função de $R_{x\,calculado}$ com os valores obtidos na experiência.

3) Construa uma escala graduada em ohms para o ohmímetro experimental.

4) Estabeleça uma comparação entre o ohmímetro paralelo e o ohmímetro série, apontando as vantagens e desvantagens de um em relação ao outro.

5) No circuito da Figura 23.7, o potenciômetro foi ajustado em 10Ω. Calcule o valor de R_x que, quando conectado entre os terminais A e B, faz com que o galvanômetro indique uma corrente de 80mA.

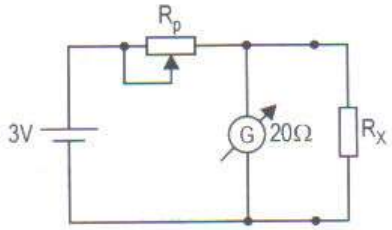


Figura 23.7

EXPERIÊNCIA

24

Osciloscópio

Objetivo

- Familiarização com o osciloscópio e seus controles.

Teoria

O osciloscópio é um instrumento cuja finalidade básica é visualizar fenômenos elétricos, possibilitando medir tensões contínuas, alternadas, períodos, frequências e defasagem com elevado grau de precisão. Os fenômenos elétricos são visualizados por meio de um **Tubo de Raios Catódicos** (TRC) que constitui o principal elemento do osciloscópio.

Esse tubo, também denominado válvula de imagem, faz surgir um feixe de elétrons no seu interior, por meio de um conjunto de elementos denominado **canhão eletrônico** que, incidindo em um anteparo ou tela, origina um ponto luminoso, que deflexionado produz uma figura. Basicamente, podemos representar um Tubo de Raios Catódicos como na Figura 24.1, e vamos descrever a finalidade de cada componente interno.

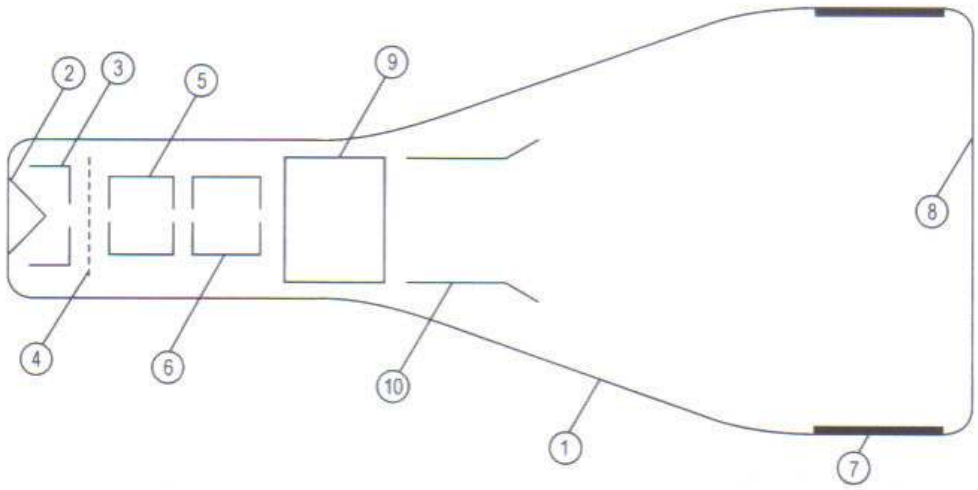


Figura 24.1 - Representação esquemática de um Tubo de Raios Catódicos.

(1) Tubo de vidro a vácuo.

(2) Filamento: quando percorrido por corrente elétrica, aquece o catodo.

(3) Catodo: sendo aquecido pelo filamento, cria ao redor de si uma nuvem de elétrons, que atraídos formam o feixe eletrônico.

(4) Grade: por meio de potencial negativo em relação ao catodo, controla a passagem do feixe de elétrons.

(5) 1º ânodo ou ânodo acelerador: por meio de potencial positivo atrai e acelera o feixe.

(6) 2º ânodo ou ânodo focalizador: por meio de potencial menor que do 3º anodo, cria um campo elétrico que concentra o feixe de elétrons, focalizando-o na tela.

(7) 3º ânodo ou revestimento condutor: mediante alta tensão positiva, atrai em definitivo o feixe, fazendo-o chocar com a tela.

(8) Tela: anteparo revestido por material químico que, ao ser atingido pelo feixe, cria um ponto luminoso. Esse revestimento é comumente denominado "fósforo".

(9) Placas defletoras horizontais: colocadas na vertical, deflexionam o feixe horizontalmente.

(10) Placas defletoras verticais: colocadas na horizontal, deflexionam o feixe verticalmente.

As placas defletoras constituem o sistema de deflexão do osciloscópio. Por meio de campo elétrico movimentam por atração o feixe, formando a figura na tela. Esse tipo de deflexão é denominado **deflexão eletrostática**, pois utiliza campo elétrico. Outro tipo é aquele que utiliza campo eletromagnético, sendo por isso denominado **deflexão eletromagnética**, utilizado em cinescópios (tubos de TV) por meio de bobinas defletoras externas ao tubo.

Para mostrar a atuação de uma das placas defletoras, vamos utilizar o tubo visto na Figura 24.2, em que aplicamos um potencial positivo às placas defletoras verticais, fazendo por atração o ponto luminoso se posicionar na parte superior da tela.

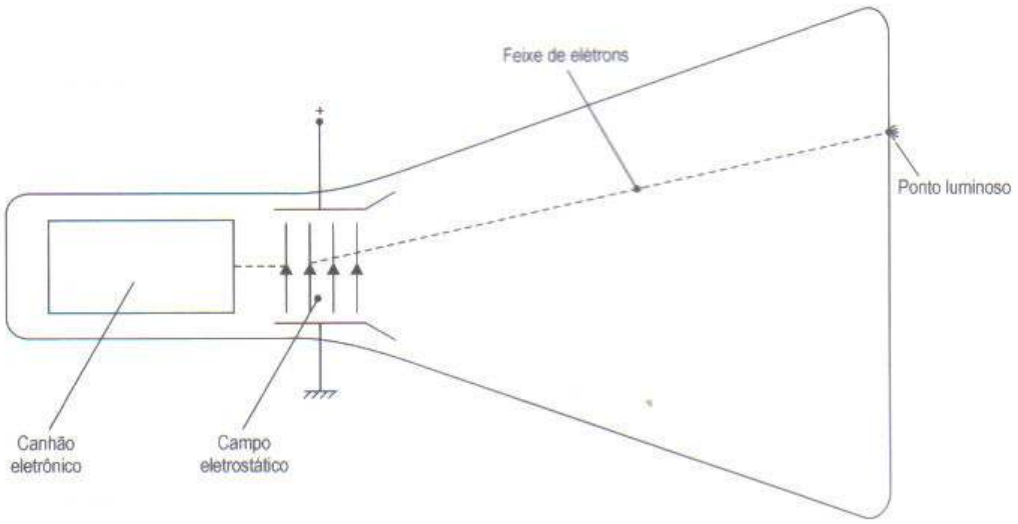


Figura 24.2 - Aplicação de potencial positivo às placas defletoras verticais.

Se esse potencial for negativo, teremos a atração do feixe para a parte inferior da tela. Aplicando um potencial variável, temos na tela o ponto oscilando continuamente e dependendo da frequência, devido à alta persistência existente no tubo, formando um traço vertical.

De forma análoga, utilizando as placas defletoras horizontais, temos um traço horizontal.

Para descrever a estrutura interna do osciloscópio, bem como a atuação de seus controles, vamos utilizar o diagrama de blocos visto na Figura 24.3.

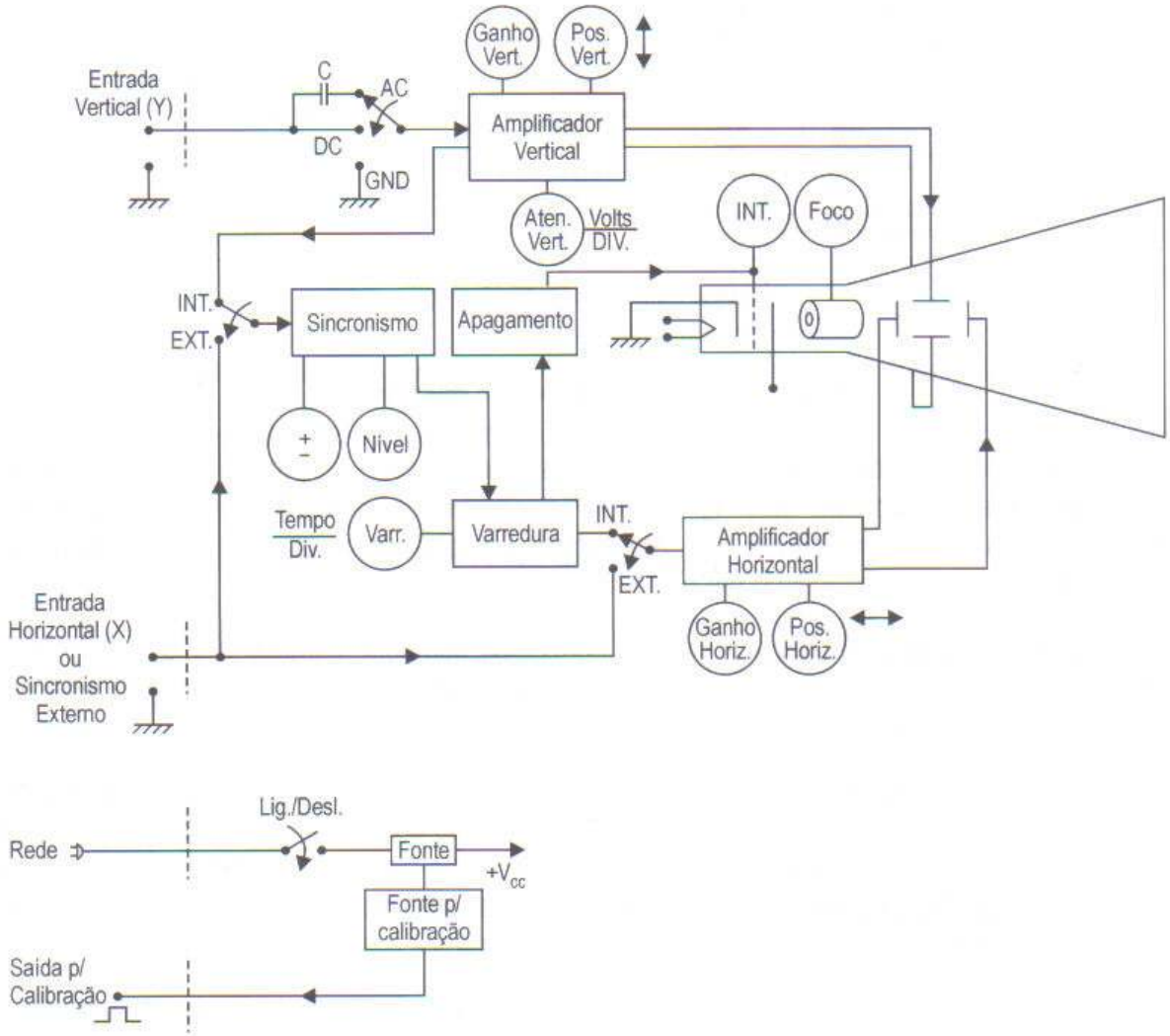


Figura 24.3 - Diagrama de blocos do osciloscópio.

Por meio de uma ponta de prova direta ou atenuada, aplicamos o sinal o ser observado e medido à entrada vertical. Esse sinal passa para o amplificador vertical por meio do circuito da chave AC/DC, que o coloca em um nível conveniente para as placas defletoras verticais.

Paralelamente, às placas defletoras horizontais é aplicado um sinal dente de serra, originado pelo estágio de varredura, que faz a devida deflexão horizontal, fornecendo uma base de tempo. Para tanto, é necessário que a varredura esteja comutada com o amplificador horizontal por meio da chave INT./EXT. na posição INT.

Conjuntamente ao estágio de varredura, encontramos o circuito de apagamento que tem como finalidade apagar o feixe no retorno, para o início de um novo ciclo de deflexão. Os sinais de varredura e apagamento são mostrados na Figura 24.4.

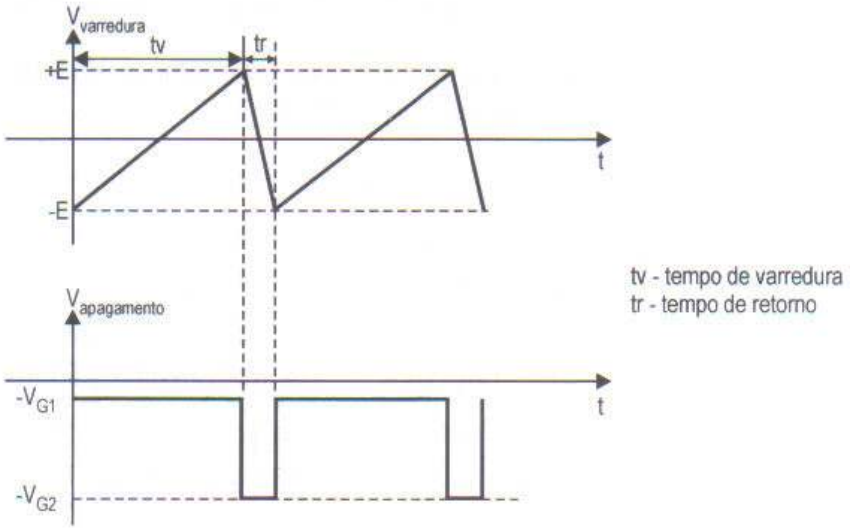


Figura 24.4 - Sinais de varredura e apagamento.

Durante o tempo de varredura (tv) aplicamos uma variação de potencial do –E a +E às placas defletoras horizontais, fazendo o feixe varrer a tela da esquerda para a direita. Logo após, em um período tr menor que tv, o feixe retorna à posição inicial apagado, por atuação do estágio de apagamento, aplicando um pulso negativo à grade do tubo.

Outra possibilidade é utilizar a entrada horizontal, bastando comutar a chave INT./EXT. para a posição EXT. (externa). Nessa situação, é possível aplicar externamente o sinal às placas defletoras horizontais sem atuação da varredura e do apagamento.

O estágio de sincronismo faz com que o sinal da varredura seja aplicado às placas defletoras horizontais, em sincronismo com o sinal aplicado à entrada vertical, para obter uma melhor fixação da figura na tela. Para tanto, o estágio, tendo a chave comutada para a posição INT. (interno), gatilha a varredura por meio de uma amostra do sinal de entrada, proveniente do amplificador vertical.

Nesse estágio encontramos os controles de nível e de polaridade de sincronismo (±) que, respectivamente, controlam a amplificação dessa amostra e a polaridade de início a ser visualizada na tela. Podemos também operar com uma amostra externa; basta colocar a chave na posição EXT. e injetá-la na entrada de sincronismo externo.

Apresentamos na Figura 24.5 o painel frontal de um modelo padrão. Vamos descrever a finalidade de seus principais controles e conectores de entradas e saídas.

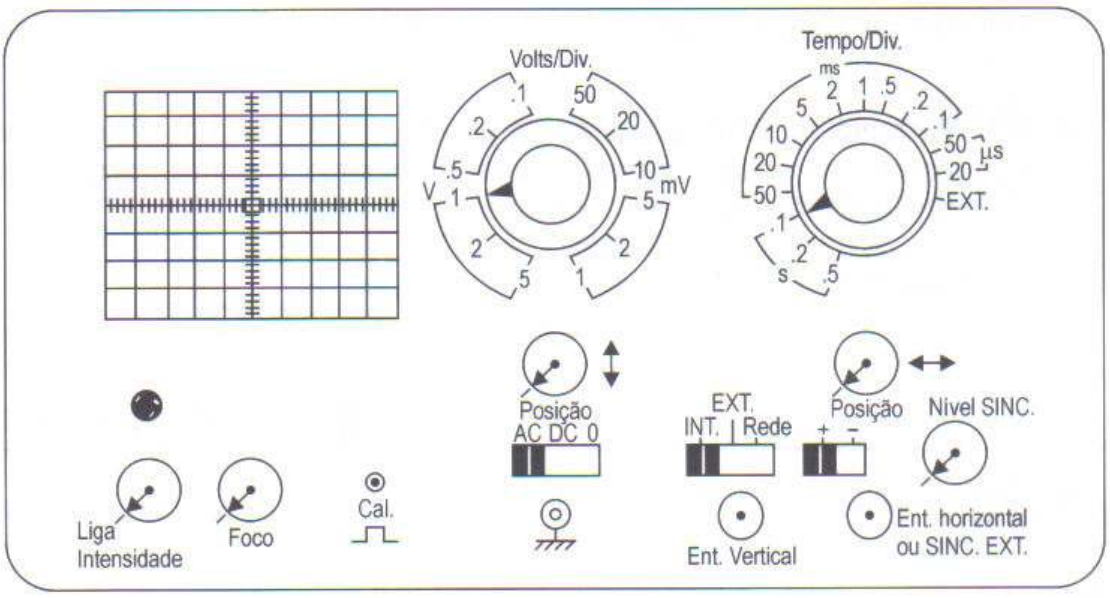


Figura 24.5 - Osciloscópio padrão.

- **Liga/Intensidade**: liga o osciloscópio e possibilita o ajuste de intensidade de brilho.
- **Foco**: possibilita o ajuste do foco do feixe eletrônico.
- **Posição** ↕: posiciona verticalmente o feixe.
- **Posição** ↔: posiciona horizontalmente o feixe.
- **Chave AC/DC/O**: na posição AC permite a leitura de sinais alternados, na posição DC, de níveis DC ou contínuos e na posição O aterra a entrada da amplificação vertical, desligando a entrada vertical.
- **Volts/div.**: atenuador vertical que gradua cada divisão na tela, na direção vertical, em valores específicos de tensão.
- **Tempo/div.**: varredura ou base de tempo que gradua cada divisão na tela, na direção horizontal, em valores específicos de tempo; além disso, possibilita desligar o estágio, dando acesso à entrada horizontal.
- **Chave INT./EXT./REDE**: na posição INT. permite a utilização do sincronismo interno, na posição EXT. dá acesso à entrada de sincronismo externo e na posição REDE sincroniza a varredura com a rede elétrica.
- **Chave + -**: permite selecionar a polaridade de sincronismo da figura na tela.
- **Nível Sinc.**: permite o ajuste do nível de sincronismo.
- **Cal.**: saída de um sinal interno de frequência e amplitude definidas, utilizado para referência e calibração.

- **Ent. Vertical**: conector para ligação de ponta de prova para o acesso ao estágio vertical.
- **Ent. Horizontal ou Sinc. Ext.**: conector para ligação de ponta de prova, utilizado para o acesso ao estágio horizontal, ou de sincronismo, conforme posicionamento dos controles de varredura (EXT.) ou sincronismo (EXT.).
- : Conector do terra do instrumento.

Material Experimental

- Osciloscópio.

Parte Prática

1) Faça um esquema do painel frontal do osciloscópio de sua bancada.
2) Ligue o osciloscópio com a entrada vertical conectada à saída de calibração, por meio de uma ponta de prova.
3) Verifique e anote a atuação de cada controle.

EXPERIÊNCIA

25

Medidas de Tensão e de Frequência com o Osciloscópio

Objetivos

- Verificar, com o osciloscópio, as formas de onda senoidal, triangular e quadrada.
- Medir tensões alternadas, contínuas e frequência com o osciloscópio.

Teoria

Vimos que a tensão contínua (V_{DC}) é aquela que não muda sua polaridade com o tempo. Essa tensão pode ser **contínua constante** ou **contínua variável**. A tensão contínua constante mantém o seu valor em função do tempo, enquanto a tensão contínua variável varia seu valor, mas sem mudar sua polaridade. Na Figura 25.1 temos como exemplos as características de uma tensão contínua constante e tensões contínuas variáveis.

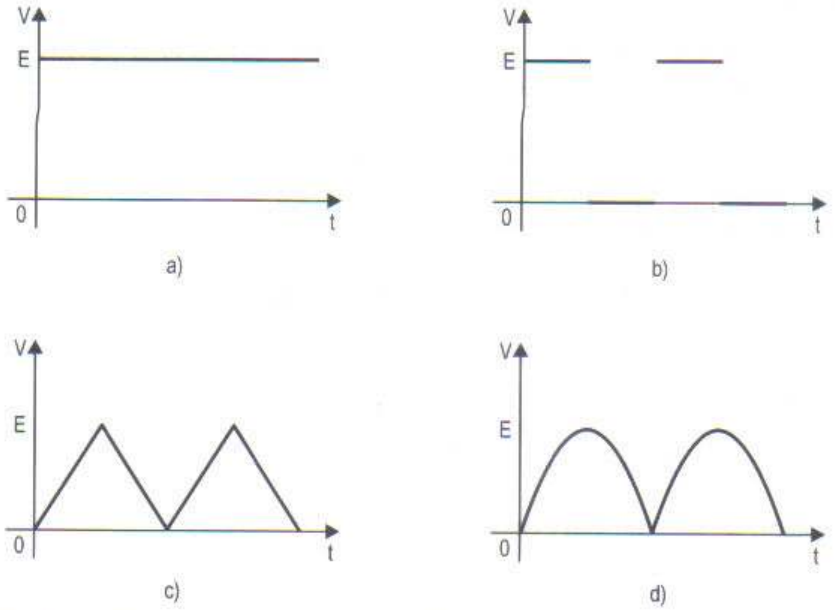


Figura 25.1 - (a) Tensão contínua constante; (b), (c) e (d) tensões contínuas variáveis.

A tensão contínua variável pode ser repetitiva ou periódica, ou seja, repetir um ciclo de mesmas características a cada intervalo de tempo. Para toda função periódica, definimos **período (T)** como sendo o tempo de duração de um ciclo completo, e **frequência (f)** como o número de ciclos em um intervalo de tempo igual a um segundo. A unidade do período é dada em segundos (s) e a frequência em hertz (Hz).

Como temos um ciclo completo da função em um tempo igual a um período e **f** ciclos em um segundo, podemos estabelecer uma regra de três e obter a relação:

$$\begin{matrix} 1 \rightarrow T \\ f \rightarrow 1 \end{matrix} \quad \therefore \quad f = \frac{1}{T} \text{ ou } T = \frac{1}{f}$$

Para uma tensão com características periódicas existe a necessidade de estabelecer um valor que indique o **componente DC** da forma de onda. Esse valor é denominado **valor DC** ou **valor médio** e representa a relação entre a área resultante da figura, em um intervalo de tempo igual a um período e o próprio período. O valor DC é medido por um voltímetro nas escalas V_{DC} e pelo osciloscópio. Para exemplificar, vamos calcular a frequência e o valor DC do sinal visto na Figura 25.2.

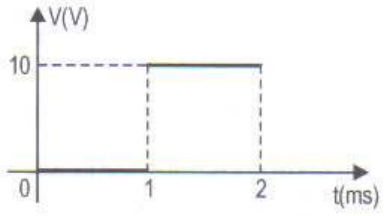


Figura 25.2 - Tensão contínua variável.

Da curva temos:

$$T = 2ms \quad \therefore \quad f = \frac{1}{2 \cdot 10^{-3}} = 500Hz$$

e

$$V_{DC} = \frac{10 \cdot (2-1) \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} = 5V$$

A **tensão alternada (V_{AC})** é aquela que muda de polaridade com o tempo. A tensão alternada que é fornecida por meio da rede elétrica é, por questões de geração e distribuição, senoidal, ou seja, obedece a uma função como:

$$\mathbf{v(t) = V_{máx}\ sen(\omega t + \theta)}$$

sendo: v(t) - valor instantâneo da tensão

$V_{máx}$ - máximo valor que a tensão pode atingir, também denominada amplitude ou tensão de pico

ω - velocidade angular ($\omega = 2\pi f$ ou $\omega = 2\pi / T$)

t - um instante qualquer

θ - ângulo de defasagem inicial

A unidade de tensão é expressa em volts [V], a de velocidade angular em radianos por segundo [rad/s], a de tempo em segundos [s] e a de ângulo de defasagem em radianos [rad]. Para exemplificar, a Figura 25.3 mostra uma tensão alternada senoidal, cuja função é:

$$v(t) = 20 \cdot \text{sen}\left(500 \cdot \pi \cdot t - \frac{\pi}{4}\right)$$

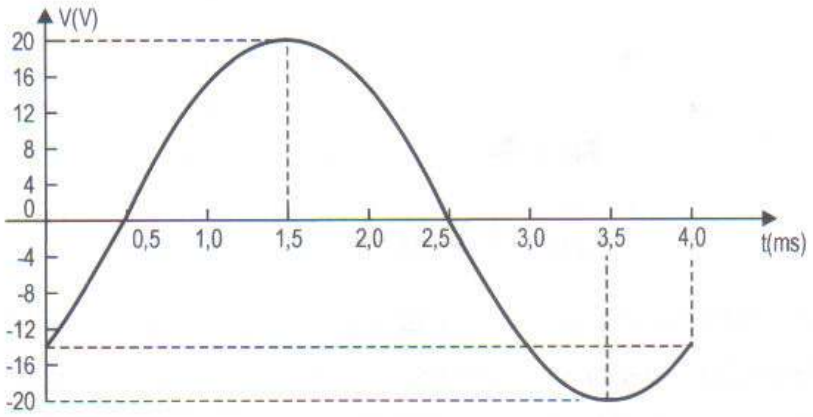


Figura 25.3 - Tensão alternada senoidal.

Notamos, por meio da função, que a tensão de pico (V_p) é igual a 20V, a velocidade angular ω é $500 \cdot \pi$ rad/s e o ângulo de defasagem inicial é $-\frac{\pi}{4}$ rad ou –45°. O período dessa função é igual a 4ms e a frequência igual a 250Hz.

Além do valor de pico (V_p), temos o **valor pico a pico (V_{pp})** que é igual à variação máxima entre o ciclo positivo e o negativo, e o **valor eficaz (V_{ef})** que equivale a uma tensão contínua que, aplicada a um elemento resistivo, dissipa a mesma potência que a alternada em questão. Para tensão alternada senoidal:

$$V_{ef} = \frac{V_p}{\sqrt{2}}$$

No exemplo, temos que:

$$V_p = 20V,\ V_{pp} = 40V \text{ e } V_{ef} = \frac{20}{\sqrt{2}} = 14{,}14V$$

Alguns dos tipos de tensão descritos podem ser gerados por um instrumento denominado **gerador de funções**. Ele gera sinais normalmente senoidais, triangulares e quadrados com possibilidade de ajustes de frequência e amplitude, dentro de faixas preestabelecidas. A Figura 25.4 exibe um modelo padrão; descrevemos a seguir a finalidade de cada controle.

Figura 25.4 - Gerador de sinais padrão.

- **Escala de frequência:** permite ajustar o algarismo da frequência a ser multiplicado.
- **Multiplicador:** seleciona um fator multiplicativo para a escala de frequência.
- **Função:** seleciona a função a ser gerada: senoidal, triangular ou quadrada.
- **Amplitude:** ajusta a amplitude do sinal de saída.

Utilizando o osciloscópio, podemos visualizar e medir os tipos de tensão descritos. Vamos utilizar o canal vertical do osciloscópio que, como entrada, dispõe da chave AC/DC/O, conforme visto no diagrama de blocos. Na posição DC faz com que o sinal por meio do amplificador vertical chegue às placas defletoras verticais, com o acoplamento direto, sem a perda de seu nível DC. Na posição AC faz com que passe por um capacitor, cuja finalidade é o bloqueio do nível DC, e permite que chegue ao amplificador vertical somente a variação do sinal.

Para medidas de tensão contínua injeta-se o sinal na entrada vertical, ajusta-se uma referência na tela por meio dos controles de posicionamento e comuta-se a chave AC/DC/O da posição AC para DC. Percebe-se, nessa situação, um deslocamento do sinal, equivalente ao seu nível DC e proporcional à posição do controle de atenuação vertical. O valor da medida é o resultado da multiplicação do número de divisões deslocadas pela posição do atenuador vertical. A Figura 25.5 exemplifica uma medida de tensão contínua.

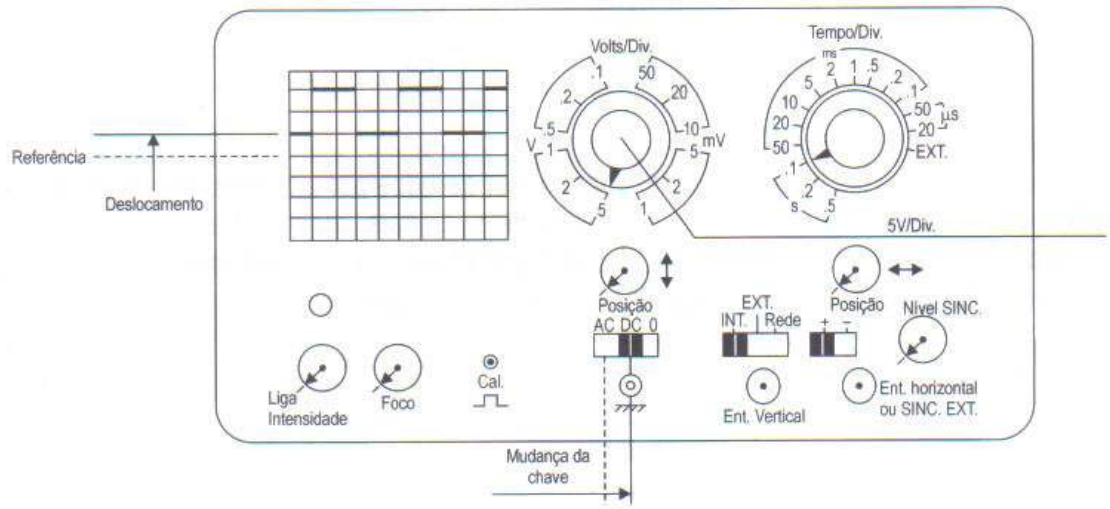


Figura 25.5 - Exemplo de medida de tensão DC.

O valor medido será:

$$V_{DC} = \frac{5V}{div} \cdot 1div = 5V$$

Para medidas de tensão alternada, injeta-se o sinal na entrada vertical, posicionando-o por meio dos controles para melhor leitura. Com o estágio da varredura ligado, teremos na tela a forma de onda, na qual é possível medir o valor de pico (V_p) ou valor pico a pico (V_{pp}), bastando multiplicar o número de divisões ocupadas pela posição do atenuador vertical. A Figura 25.6 exemplifica uma medida de tensão alternada.

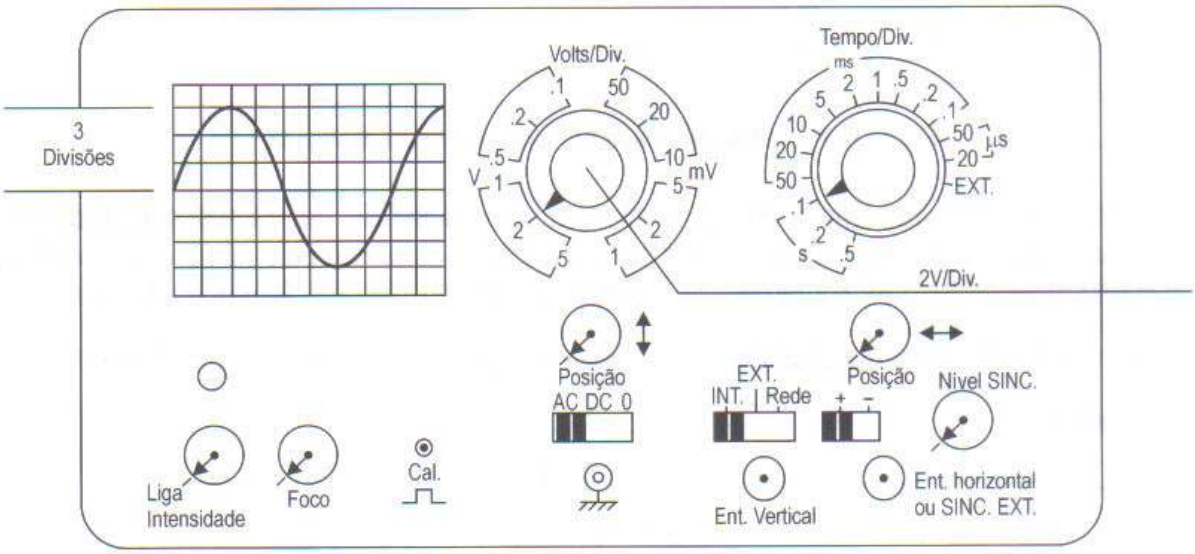


Figura 25.6 - Exemplo de medida de tensão AC.

O valor de V_p medido será:

$$V_p = \frac{2V}{div} \cdot 3div = 6V$$

e o valor V_{pp} medido será:

$$V_{pp} = \frac{2V}{div} \cdot 6div = 12V$$

Para melhor procedimento nas medidas, é possível desligar o estágio de varredura. Nessa situação não temos mais a forma de onda na tela e sim sua variação em amplitude, ou seja, um traço vertical, suficiente para as medidas de V_p ou V_{pp}. A Figura 25.7 demonstra essa situação, na qual obtemos os mesmos resultados.

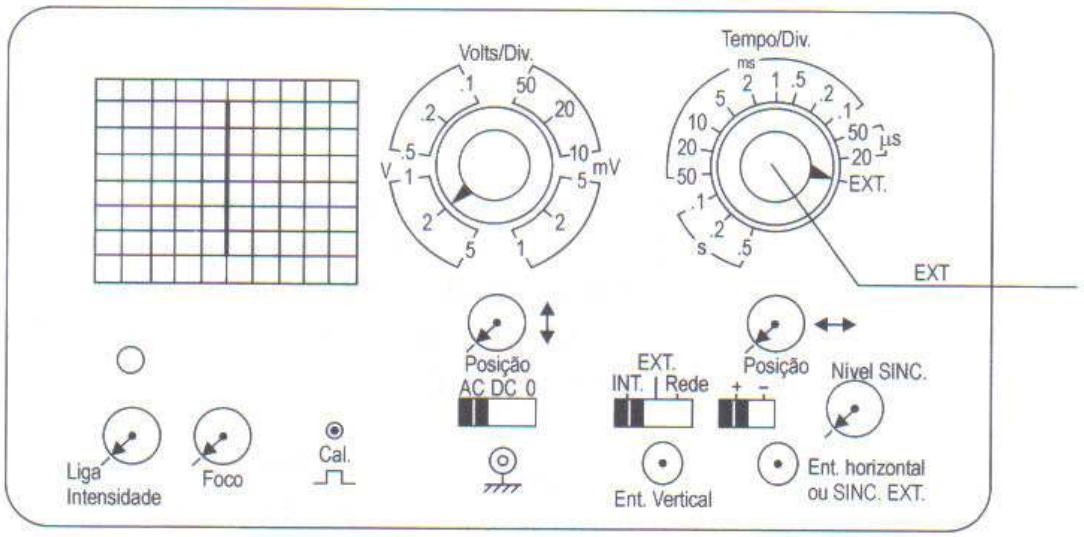


Figura 25.7 - Medida de tensão AC com a varredura desligada.

Para medir a frequência de um sinal com o osciloscópio, utilizamos o método de varredura calibrada, em que multiplicamos o valor da base de tempo pelo número de divisões ocupadas pelo período da figura na tela, obtendo o valor do período. A frequência obtém-se indiretamente, utilizando a expressão $f = \frac{1}{T}$. Para exemplificar, consideremos o sinal mostrado na Figura 25.8.

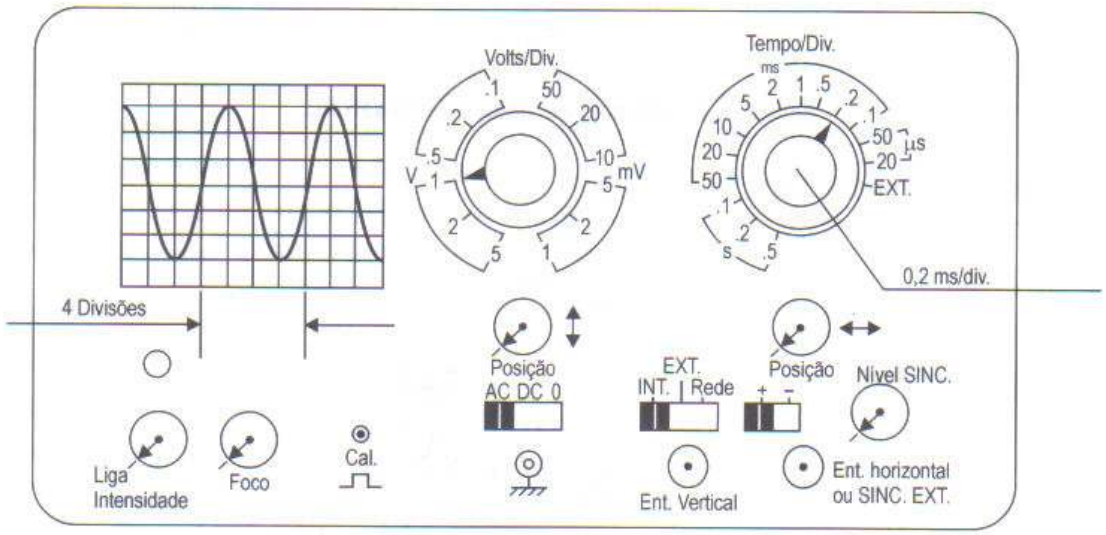


Figura 25.8 - Exemplo de medida de frequência.

O valor do período será $T = 4div \cdot 0{,}2ms/div \;\therefore\; T = 0{,}8ms$

e o valor da frequência será $f = \frac{1}{0{,}8 \cdot 10^{-3}} \;\therefore\; f = 1250Hz$

- Fonte variável.
- Osciloscópio.
- Gerador de sinais.
- Multímetro.

Simbologia

Parte Prática

1) Ajuste a fonte de tensão com o voltímetro para os valores especificados no Quadro 25.1. Meça cada valor com o osciloscópio, anotando a posição do atenuador vertical e o número de divisões do deslocamento, conforme ligação vista na Figura 25.9.

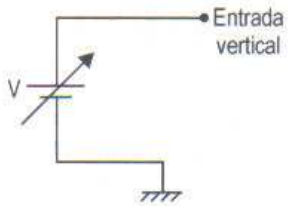


Figura 25.9

V(V)	Pos. atenuador	Número de divisões	V_{medido} osciloscópio
2			
5			
8			
10			
15			

Quadro 25.1

2) Ajuste o gerador de sinais para as frequências especificadas nos Quadros 25.2, 25.3 e 25.4 com amplitude máxima para as formas de onda senoidal, quadrada e triangular. Meça cada frequência com o osciloscópio anotando, respectivamente, a posição da varredura e o número de divisões ocupadas pelo período, conforme ligação mostrada na Figura 25.10.

Onda senoidal				
$f_{gerador}$	Pos. de varredura	Número de divisões	T	f
100Hz				
5KHz				

Quadro 25.2

Onda quadrada				
$f_{gerador}$	Pos. de varredura	Número de divisões	T	f
250Hz				
1200Hz				

Quadro 25.3

Onda triangular				
$f_{gerador}$	Pos. de varredura	Número de divisões	T	f
600Hz				
10KHz				

Quadro 25.4

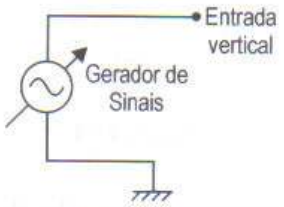


Figura 25.10

3) Ajuste o gerador de sinais para frequência de 60Hz, onda senoidal. Utilizando o multímetro, na escala V_{AC} ajuste a saída do gerador para os valores especificados no Quadro 25.5. Para cada caso, meça com o osciloscópio e anote, respectivamente, a tensão V_p e a tensão V_{pp}, conforme ligação da Figura 25.11.

V_{ef} voltímetro	V_p	V_{pp}	V_{ef} calculado
1V			
3V			
5V			

Quadro 25.5

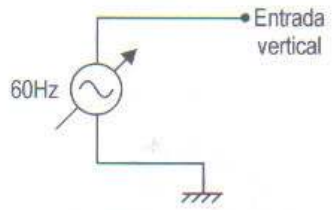


Figura 25.11

Exercícios

1) Utilizando os valores de pico obtidos com o osciloscópio no item 3 da experiência, calcule os valores eficazes, preenchendo o Quadro 25.5, comparando-os com os medidos pelo voltímetro.

2) Por meio do gráfico da Figura 25.12, determine:

a) T e f

b) V_p, V_{pp} e V_{ef}

c) A equação V(t)

d) v(t) para t = 15ms e t = 22ms

e) V_{DC}

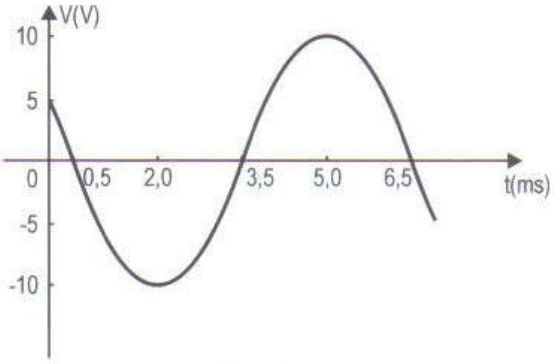


Figura 25.12

3) Calcule T, f e V_{DC} para a tensão da Figura 25.13.

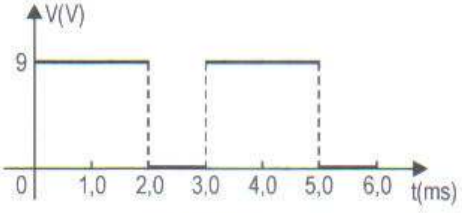


Figura 25.13

4) Determine frequência e amplitude do sinal visto na tela do osciloscópio da Figura 25.14.

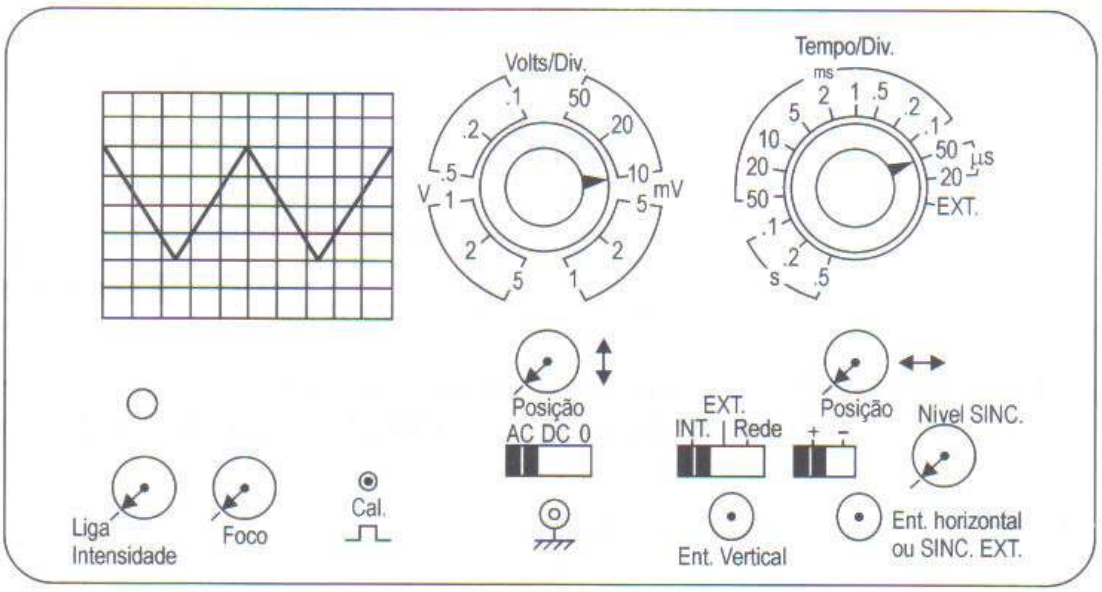


Figura 25.14

EXPERIÊNCIA

26

Figuras de Lissajous e Medidas de Defasagem

Objetivos

- Observar, experimentalmente, as figuras de Lissajous.
- Medir a defasagem entre dois sinais, utilizando o osciloscópio.

Teoria

A composição gráfica de dois movimentos ondulatórios, sendo um na horizontal e outro na vertical, resulta na chamada **Figura de Lissajous**. Para exemplificar, consideremos a Figura 26.1, na qual temos composição de um sinal na vertical de determinada frequência, e um outro na horizontal com o dobro de frequência.

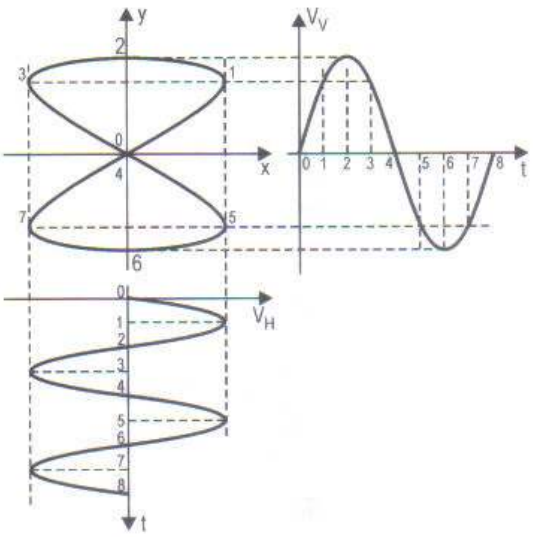


Figura 26.1 - Figura de Lissajous resultante da composição de dois sinais.

Da Figura de Lissajous obtida podemos estabelecer uma relação entre as frequências dos dois sinais, conforme o número de vezes que a figura toca na linha de tangência horizontal e na vertical. Para o exemplo, temos que a figura tangencia na horizontal uma vez e na vertical duas vezes, portanto a relação entre as frequências será:

$$1 \cdot F_H = 2 \cdot F_V \qquad \frac{F_V}{F_H} = \frac{1}{2}$$

Para um caso genérico, podemos escrever a relação:

$$\frac{F_V}{F_H} = \frac{N_H}{N_V}$$

sendo: F_V - frequência do sinal vertical

F_H - frequência do sinal horizontal

N_H - número de tangências na horizontal

N_V - número de tangências na vertical

Podemos utilizar as Figuras de Lissajous para medidas de frequência e de defasagem com o osciloscópio.

Para medir frequências, basta aplicar o sinal a ser medido em uma das entradas do osciloscópio, e um outro com frequência conhecida na outra entrada. Da Lissajous obtida na tela determinam-se $\mathbf{N_V}$, $\mathbf{N_H}$ e aplicando a relação, calcula-se a frequência desconhecida. A Figura 26.2 mostra o esquema de ligação para determinar a frequência de um sinal desconhecido.

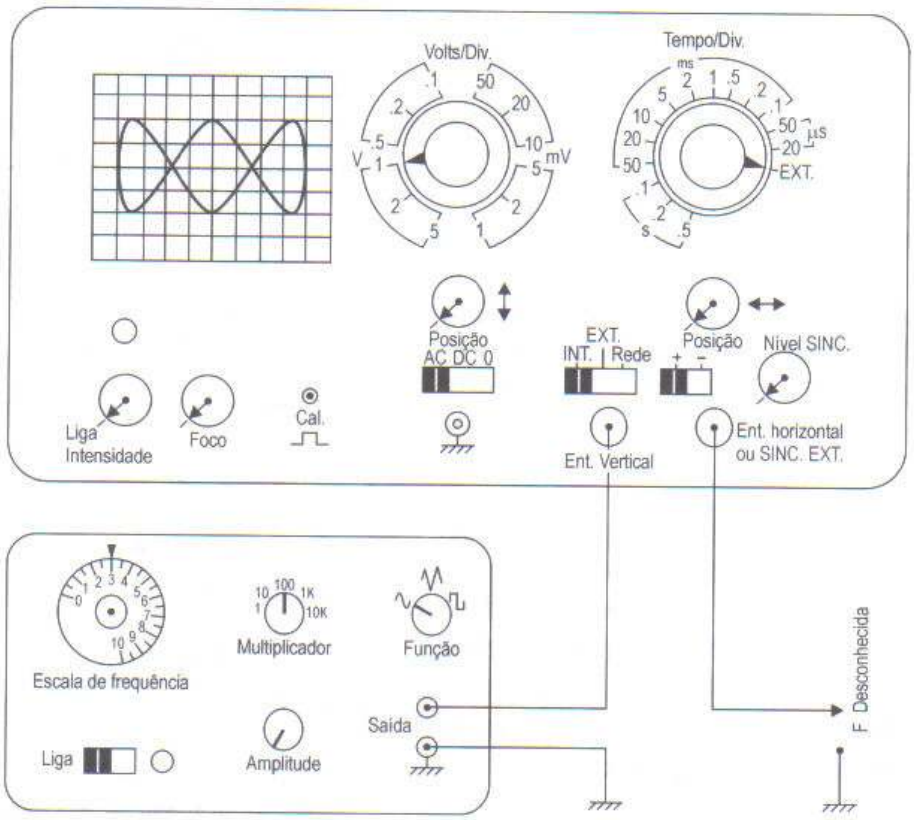


Figura 26.2 - Ligações do osciloscópio para a medida de frequência, utilizando Lissajous.

Na entrada vertical, o gerador foi ajustado para a frequência de 300Hz. Aplicando o sinal de frequência desconhecida na entrada horizontal, obteve-se na tela uma Figura de Lissajous com três pontos de tangência na horizontal e um na vertical. Aplicando a relação, obtemos:

$$3 \cdot F_H = 1 \cdot F_V \quad \therefore \quad F_H = \frac{F_V}{3} = \frac{300}{3} = 100\text{Hz}$$

Quando aplicamos às duas entradas do osciloscópio sinais de uma mesma frequência, temos na tela uma Figura de Lissajous, na qual é possível determinar o valor da **defasagem** entre eles.

Chamamos de defasagem a diferença de fase entre dois sinais de mesma frequência. Para exemplificar, a Figura 26.3 exibe o sinal $v_1(t)$ e o sinal $v_2(t)$, plotados nos mesmos eixos.

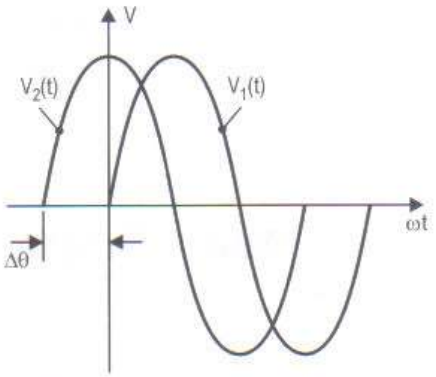


Figura 26.3 - Sinais $v_1(t)$ e $v_2(t)$.

em que: $v_1(t) = v_{1\,máx}\ \text{sen}(\omega t + 0°)$

$$v_2(t) = v_{2\,máx}\ \text{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

A defasagem entre $v_1(t)$ e $v_2(t)$ é:

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{2}\text{rad ou } 90°$$

Para dois sinais quaisquer de mesma frequência e defasados, a tela do osciloscópio mostra uma **elipse** como Figura de Lissajous. A Figura 26.4 ilustra a composição de dois sinais defasados e a elipse resultante.

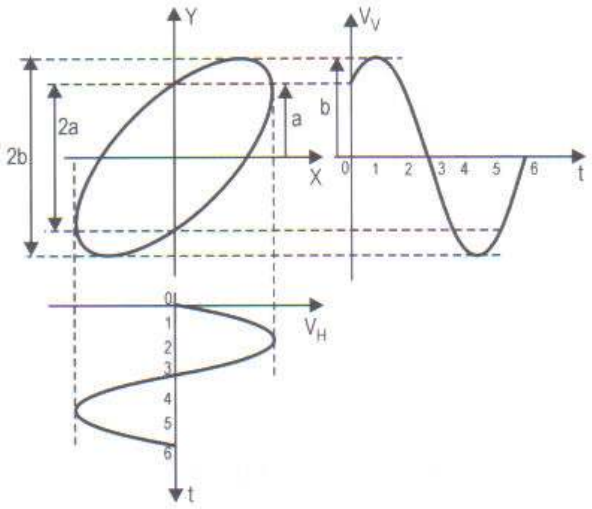


Figura 26.4 - Elipse resultante da composição de dois sinais defasados.

O sinal V_V obedece à função:

$$V_V(t) = V_{V\,máx} \cdot \text{sen}(\omega t + \Delta\theta)$$

em que: $V_{V\,máx} = b$

$V_V(t) = a$, para $t = 0$

substituindo, temos que:

$$a = b \cdot \text{sen}(\omega \cdot 0 + \Delta\theta) \qquad a = b \cdot \text{sen}\,\Delta\theta$$

$$\text{sen}\,\Delta\theta = \frac{a}{b} \ \therefore\ \Delta\theta = \text{arc sen}\frac{a}{b}$$

Para determinar a defasagem por meio da elipse obtida, basta obter os valores de **a** e **b**, em que **a** representa a distância entre o centro da elipse e o ponto em que ela corta o eixo y e **b** representa a distância entre o centro da elipse e o ponto máximo da figura. Para facilitar a leitura, podemos determinar os valores de **2a**, **2b** e calcular a defasagem, utilizando a relação:

$$\Delta\theta = \text{arc sen}\frac{2a}{2b}$$

Como exemplo, vamos determinar a defasagem entre dois sinais aplicados às entradas do osciloscópio, cuja Figura de Lissajous é mostrada na Figura 26.5.

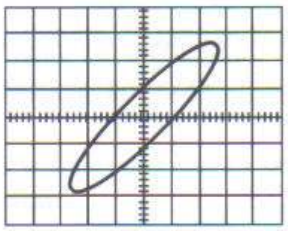


Figura 26.5 - Elipse.

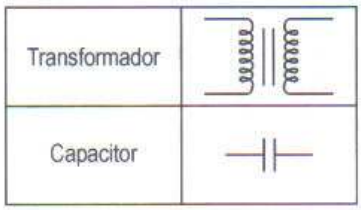
Temos que 2a = 3 e 2b = 6.

$$\therefore \Delta\theta = \text{arc sen}\frac{3}{6} \qquad \Delta\theta = \frac{\pi}{6}\text{rad} \quad \text{ou } 30°$$

Material Experimental

- Osciloscópio.
- Gerador de sinais.
- Transformador: 110V/12V ou 220V/12V (conforme a rede).
- Capacitor: 0,1 μF.
- Resistores: 4,7KΩ, 47KΩ, 150KΩ, 470KΩ e 1MΩ.

Simbologia



Parte Prática

1) Ligue à entrada vertical do osciloscópio o gerador de sinais ajustado para onda senoidal e amplitude máxima, e à entrada horizontal o transformador, conforme mostra a Figura 26.6.

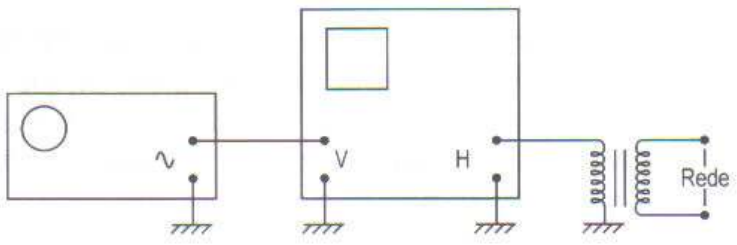


Figura 26.6

2) Varie a frequência do gerador de sinais, conforme o Quadro 26.1. Anote a Figura de Lissajous e determine a relação de frequências.

F_H(Hz)	F_V(Hz)	Figura	N_H	N_V	N_H/N_V
60	15				
	20				
	24				
	30				
	40				
	60				
	90				
	120				
	150				
	180				
	240				

Quadro 26.1

3) Monte o circuito da Figura 26.7 com o gerador ajustado em 60Hz, amplitude máxima e onda senoidal.

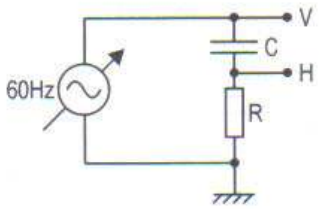


Figura 26.7

4) Meça e anote os valores de 2a e 2b de acordo com o capacitor e resistores indicados no Quadro 26.6.

C(μF)	R	2a	2b	2a/2b	Δθ
0,1	4,7KΩ				
	47KΩ				
	150KΩ				
	470KΩ				
	1MΩ				

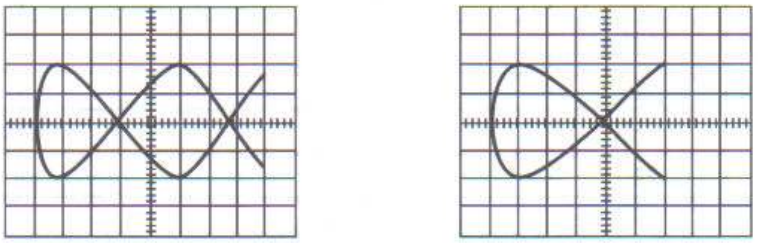
Quadro 26.2

Observação: *Utilizamos nesta experiência um transformador e como circuito defasador o RC série. Tais dispositivos são estudados nas próximas experiências.*

1) Comprove a relação $\frac{F_V}{F_H} = \frac{N_H}{N_V}$ com os valores do Quadro 26.1.

2) Calcule a defasagem, utilizando os valores obtidos no Quadro 26.2, para cada valor de resistor. Anote os resultados no próprio quadro.

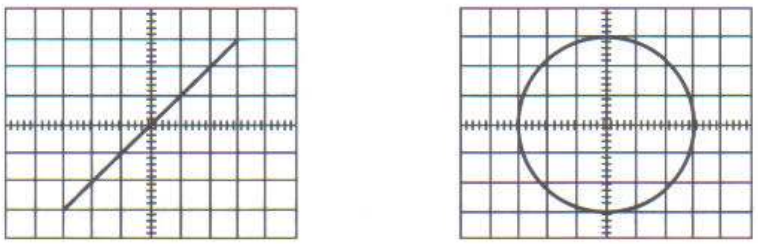
3) Calcule o valor da frequência desconhecida por meio das Lissajous, vistas na tela do osciloscópio, conforme mostra a Figura 26.8.



(a) F_H=600Hz (b) F_V=150Hz

Figura 26.8

4) Calcule a defasagem por meio das Lissajous, vistas na tela do osciloscópio, conforme a Figura 26.9.



(a) (b)

Figura 26.9

EXPERIÊNCIA

27

Capacitor em Regime DC

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, as situações de carga e descarga de um capacitor.

Teoria

O capacitor é um componente que tem como finalidade armazenar energia elétrica. É formado por duas placas condutoras, também denominadas **armaduras**, separadas por um material isolante ou **dielétrico**. Ligados a essas placas condutoras estão os terminais para conexão deste com outros componentes, conforme mostra a Figura 27.1.

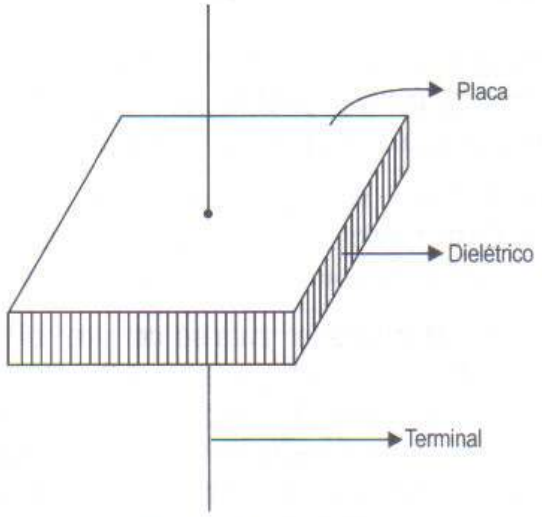


Figura 27.1 - Capacitor.

Capacitância (C) é a característica que o capacitor apresenta de armazenar mais ou menos cargas elétricas por unidade de tensão.

Portanto, podemos escrever a relação:

$$C = \frac{Q}{V}$$

em que: C - capacitância

Q - carga elétrica

V - tensão

Quando aplicarmos uma tensão igual a 1 volt (V) e o capacitor armazenar 1 coulomb (C), teremos então uma capacitância igual a 1 farad (F).

Devido às dificuldades construtivas, os capacitores encontram-se situados em faixa de valores submúltiplos do farad, como microfarad (μF), nanofarad (nF) e o picofarad (pF).

$$1\mu F = 10^{-6}F$$

$$1nF = 10^{-9}F$$

$$1pF = 10^{-12}F$$

Além do valor da capacitância, é preciso especificar o valor limite da tensão a ser aplicada entre seus terminais. Esse valor é denominado **tensão de isolação** e varia conforme o tipo de capacitor.

Na prática, encontramos vários tipos de capacitor com aplicações específicas, dependendo de aspectos construtivos, tais como material utilizado como dielétrico, tipo de armadura e encapsulamento. Dentro dos diversos tipos, destacamos:

1) **Capacitores plásticos** (poliestireno, poliéster): consistem em duas folhas de alumínio separadas pelo dielétrico de material plástico. Sendo os terminais ligados às folhas de alumínio, o conjunto é bobinado e encapsulado, formando um sistema compacto.

   Uma outra técnica construtiva é vaporizar alumínio em ambas as faces do dielétrico, formando o capacitor. Essa técnica denomina-se metalização e traz como vantagem maior capacidade em comparação com os de mesmas dimensões dos não metalizados.

2) **Capacitores eletrolíticos de alumínio:** trata-se de uma folha de alumínio anodizada como armadura positiva, em que, por um processo eletrolítico, forma-se uma camada de óxido de alumínio, que serve como dielétrico, e um fluido condutor, o eletrólito que impregnado em papel poroso é colocado em contato com outra folha de alumínio de maneira a formar a armadura negativa. O conjunto é bobinado, sendo a folha de alumínio anodizada, ligada ao terminal positivo e outra ligada a uma caneca tubular, encapsulamento do conjunto, e ao terminal negativo.

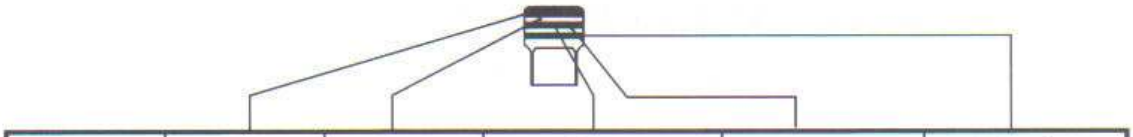
   Os capacitores eletrolíticos, por apresentarem o dielétrico como uma fina camada de óxido de alumínio e em uma das armaduras um fluido, constituem uma série de altos valores de capacitância, mas com valores limitados de tensão de isolação e terminais polarizados.

De forma idêntica, encontramos os capacitores eletrolíticos de tântalo, em que o dielétrico é formado por óxido de tântalo, cuja constante dielétrica faz obter um capacitor de pequenas dimensões, porém com valores de tensão de isolação mais limitados.

3) **Capacitores cerâmicos:** apresentam como dielétrico um material cerâmico que é revestido por uma camada de tinta, que contém elemento condutor formando as armaduras. O conjunto recebe um revestimento isolante. São capacitores de baixos valores e altas tensões de isolação.

Os capacitores, analogamente aos resistores, possuem valores de capacitância padronizados que obedecem à sequência 1 - 1,2 - 1,5 - 1,8 - 2,2 - 2,7 - 3,3 - 4,7 - 5,6, - 6,8, - 8,2 com fator multiplicativo, conforme a faixa desde pF até μF.

Normalmente, o valor da capacitância, a tensão de isolação e a tolerância são impressos no próprio encapsulamento do capacitor, todavia em alguns tipos, como os de poliéster metalizado, esses parâmetros são especificados por um código de cores. A Figura 27.2 mostra esse código de cores, bem como a identificação no corpo do capacitor.



Cor	1º alg.	2º alg.	Fator multiplicativo	Tolerância	Tensão norminal
Preto	----	0	----	± 20%	----
Marrom	1	1	10^1pF	----	----
Vermelho	2	2	10^2pF	----	250V
Laranja	3	3	10^3pF	----	----
Amarelo	4	4	10^4pF	----	400V
Verde	5	5	10^5pF	----	100V
Azul	6	6	----	----	630V
Violeta	7	7	----	----	----
Cinza	8	8	10^{-2}pF	----	----
Branco	9	9	10^{-1}pF	± 10%	----

Figura 27.2 - Código de cores para capacitores.

A seguir, vamos estudar o comportamento do capacitor em regime DC na situação de carga e descarga. Ao aplicar a um capacitor uma tensão contínua por meio de um resistor, este se carrega com uma tensão cujo valor depende do intervalo de tempo em que se desenvolverá o processo. Na Figura 27.3 temos um circuito para carga do capacitor.

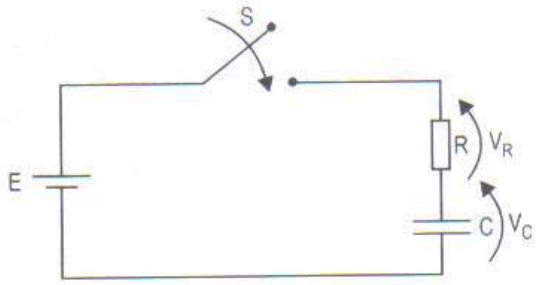


Figura 27.3 - Circuito de carga de um capacitor.

Estando o capacitor inicialmente descarregado ($V_C = 0$), em t = 0 fechamos a chave S do circuito. A corrente nesse instante é a máxima do circuito, ou seja, $I_{máx} = \frac{E}{R}$. A partir daí, o capacitor inicia um processo de carga com aumento gradativo da tensão entre seus terminais (V_C) e, consequentemente, ocorre diminuição da corrente, obedecendo a uma função exponencial, até atingir o valor zero, quando este estiver totalmente carregado.

A Figura 27.4 apresenta a variação da corrente em função do tempo.

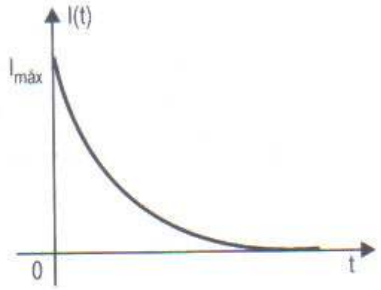


Figura 27.4 - Característica da corrente de carga de um capacitor.

A partir dessa característica podemos equacionar a corrente em função do tempo e dos componentes do circuito.

$$i(t) = I_{máx} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{ou} \quad i(t) = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

sendo: i(t) - valor da corrente num determinado instante.

$I_{máx}$ - valor inicial da corrente no circuito.

e - base do logaritmo neperiano (e = 2,72).

τ - constante de tempo do circuito ($\tau = R \cdot C$).

A partir do circuito da Figura 27.3 podemos escrever que:

$$E = V_R + V_C$$

substituindo a expressão da corrente, temos:

$$E = R \cdot i(t) + V_C$$

sendo:

$$V_C = E - \cancel{R} \cdot \frac{E}{\cancel{R}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

portanto, $V_C = E\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$ que é denominada a equação de carga do capacitor.

Por meio da equação de carga podemos levantar a característica do capacitor, ou seja, a tensão entre seus terminais em função do tempo, conforme mostra a Figura 27.5.

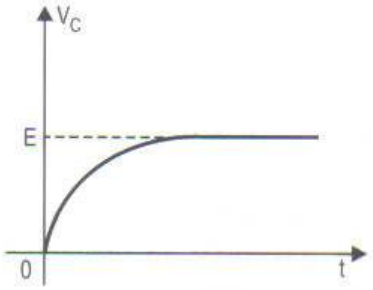


Figura 27.5 - Característica da tensão de carga de um capacitor.

Vamos calcular a tensão do capacitor em três pontos notáveis: t = 0, $t = \tau$ e $t = 5\tau$.

- Para t = 0, substituindo na equação, temos:

$$V_C = E\left(1 - e^{-\frac{0}{\tau}}\right) \therefore V_C = 0$$

- Para $t = \tau$, temos:

$$V_C = E\left(1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}\right) \therefore V_C = 0{,}632E, \text{ ou seja: } V_C = 63{,}2\% \text{ de } E$$

- Para $t = 5\tau$, temos:

$$V_C = E\left(1 - e^{-\frac{5\tau}{\tau}}\right) \therefore V_C = 0{,}993E \text{ ou seja: } V_C \cong E$$

Ou seja, o capacitor, para carregar-se totalmente, necessita de um intervalo de tempo maior que cinco vezes a sua constante de tempo. A Figura 27.6 exibe a curva de carga de um capacitor com os pontos notáveis.

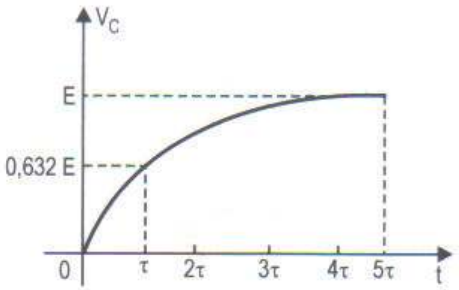


Figura 27.6 - Carga de um capacitor.

Estando o capacitor carregado, podemos montar um circuito para a sua descarga, visto na Figura 27.7.

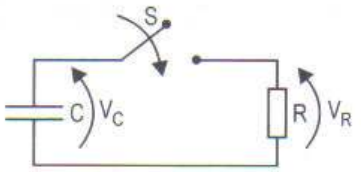


Figura 27.7 - Circuito de descarga de um capacitor.

No instante t = 0, fechamos a chave S do circuito e o capacitor inicia sua descarga por meio do resistor R. Nesse instante, a corrente no circuito será máxima e a partir daí diminui, obedecendo a uma função exponencial até atingir o valor zero, quando o capacitor estiver totalmente descarregado. Na Figura 27.8 temos essa característica.

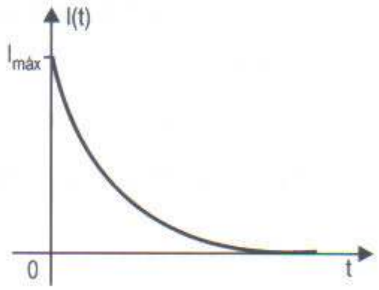


Figura 27.8 - Característica da corrente de descarga de um capacitor.

Equacionando a corrente em função do tempo, temos:

$$i(t) = I_{máx} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

No circuito da Figura 27.7, temos que:

$$V_C = V_R$$

sendo: $$V_C = R \cdot i(t)$$

$$V_C = R \cdot \left(I_{máx} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

em que: $R \cdot I_{máx} = V_{C\,máx}$ (tensão atingida pelo capacitor durante o processo de carga)

portanto, $V_C = V_{C\,máx} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ que é denominada equação de descarga do capacitor.

Por meio dessa equação podemos levantar a característica do capacitor durante a descarga, conforme mostra a Figura 27.9.

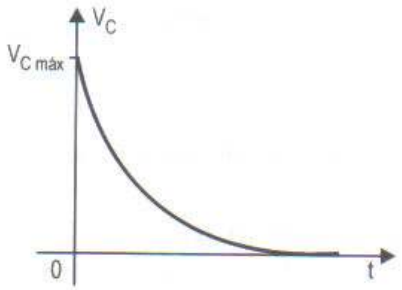


Figura 27.9 - Característica da tensão de descarga de um capacitor.

Calculando a tensão do capacitor em três pontos notáveis: t = 0, t = τ e t = 5τ, temos:

- Para t = 0 $$V_C = V_{C\,máx} \cdot e^{-\frac{0}{\tau}}$$

$$V_C = V_{C\,máx}$$

- Para t = τ $$V_C = V_{C\,máx} \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}}$$

$$V_C = 0{,}368\, V_{C\,máx} \quad \text{ou} \quad V_C = 36{,}8\% \text{ de } V_{C\,máx}$$

- Para t = 5τ $$V_C = V_{C\,máx} \cdot e^{-\frac{5\tau}{\tau}}$$

$$V_C = 0$$

Para se descarregar, o capacitor necessita de um intervalo de tempo maior que cinco vezes a sua constante de tempo. A Figura 27.10 mostra a curva da descarga do capacitor com os pontos notáveis.

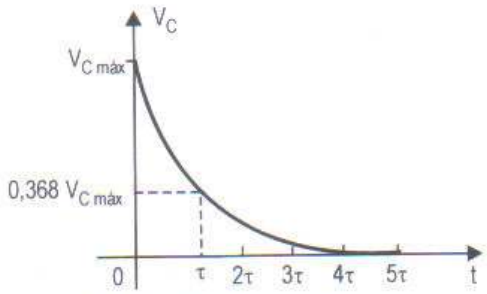


Figura 27.10 - Descarga de um capacitor.

Para exemplificar, vamos supor que no circuito da Figura 27.11 a chave S permanece na posição **1** durante 8s e em seguida passa para a posição **2**. Vamos calcular a tensão no capacitor 5s após essa situação.

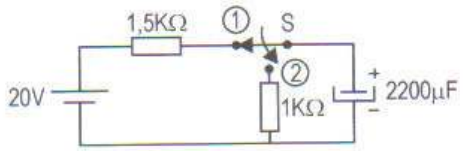


Figura 27.11 - Circuito de carga e descarga de um capacitor.

Na posição **1**, o capacitor se carrega por meio do resistor de 1,5KΩ. Calculando a constante de tempo e o valor da tensão no capacitor nesta situação, após 8s temos:

$$\tau = R \cdot C$$

$$\tau = 1{,}5 \cdot 10^{3} \cdot 2200 \cdot 10^{-6} = 3{,}3s$$

$$V_C = E\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$V_C = 20\left(1 - e^{-\frac{8}{3{,}3}}\right)$$

$$V_C = 18{,}23V$$

Na posição **2**, o capacitor se descarrega por meio do resistor de 1KΩ. Calculando a constante de tempo e o valor da tensão no capacitor nesta situação, após 5s temos:

$$\tau = 10^{3} \cdot 2200 \cdot 10^{-6} = 2{,}2s$$

$$V_C = V_{C\,máx} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$V_C = 18{,}3 \cdot e^{-\frac{5}{2{,}2}}$$

$$V_C = 1{,}88V$$

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistor: 22KΩ.
- Capacitor eletrolítico: 1000μF/25V.
- Multímetro.
- Cronômetro.

Simbologia

Capacitor Eletrolítico	+ −

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 27.12 com o capacitor descarregado.

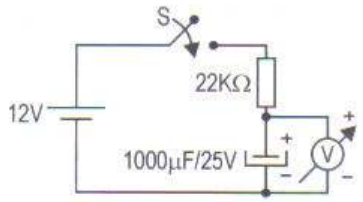


Figura 27.12

2) Acione a chave S e o cronômetro simultaneamente. Determine e anote o instante em que cada tensão for atingida, conforme o Quadro 27.1

V_C(V)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
t(s)													

Quadro 27.1

3) Com o capacitor carregado, monte o circuito da Figura 27.13.

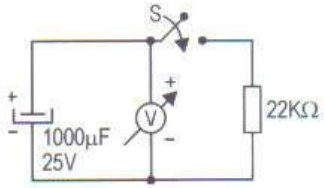


Figura 27.13

4) Repita o item 2 para o Quadro 27.2.

V_C(V)	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
t(s)													

Quadro 27.2

Exercícios

1) Com os valores obtidos na experiência, construa os gráficos $V_c = f(t)$ para a carga e descarga do capacitor.

2) Para os circuitos da experiência calcule a tensão no capacitor, decorridos 10s para a situação de carga e 15s para a situação de descarga. Compare esses valores com os obtidos graficamente para esses mesmos instantes.

3) Calcule o intervalo de tempo necessário para que o capacitor do circuito da Figura 27.14 se carregue com uma tensão igual a 8V, após acionada a chave S.

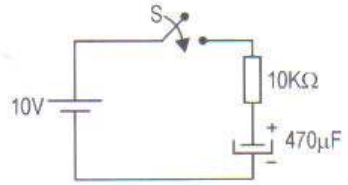


Figura 27.14

4) Calcule o valor da corrente I indicada no circuito da Figura 27.15, após decorridos 40s do acionamento da chave S.

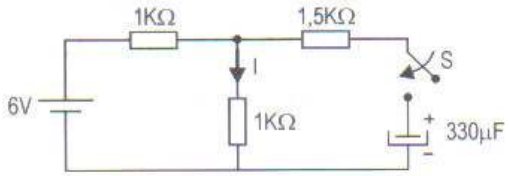


Figura 27.15

EXPERIÊNCIA

28

Indutor em Regime DC

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o comportamento de um indutor quando submetido a uma tensão contínua.

Teoria

Um fio condutor, ao ser percorrido por uma corrente elétrica, cria ao redor de si um campo magnético. Para melhor aproveitar esse campo, enrolamos o fio condutor em forma de espiral ao redor de um núcleo, constituindo o componente denominado **indutor**.

Chamamos de **indutância (L)** o parâmetro que relaciona esse efeito do campo magnético com a corrente que o produziu, e sua unidade é o henry (H), tendo como submúltiplos o mili-henry (mH) e o micro-henry (μH).

A Figura 28.1 esquematiza um indutor.

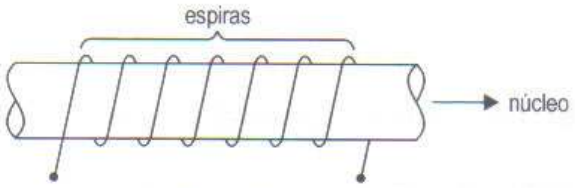


Figura 28.1 - Indutor.

Os indutores podem ser fixos ou variáveis. Os indutores fixos são constituídos por um fio de cobre esmaltado, enrolado ao redor de um núcleo que pode ser de ar, de ferro ou de ferrite. O indutor com núcleo de ar é simplesmente constituído pelo enrolamento do próprio fio e proporciona baixos valores de indutância. Os núcleos de ferro e de ferrite proporcionam valores mais altos de indutância. O de ferrite, pó de ferro com aglutinante, é aplicado principalmente em altas frequências.

Os indutores variáveis consistem num sistema em que o núcleo é móvel, podendo o valor da indutância ser ajustado externamente dentro de uma faixa preestabelecida.

A seguir, vamos estudar o comportamento do indutor em regime DC. Ao aplicar a um indutor uma tensão contínua por meio de um resistor, este armazena energia magnética, pois a corrente cria um campo magnético no indutor, conforme já visto.

Na Figura 28.2 temos um circuito para tal finalidade.

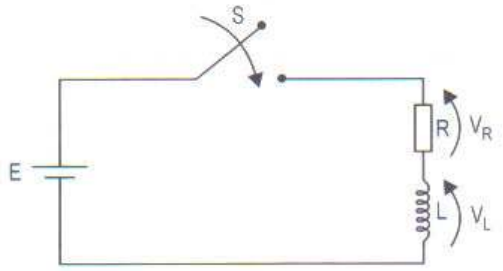


Figura 28.2 - Circuito de energização de um indutor.

Estando o indutor inicialmente desenergizado, em t = 0, fechamos a chave S do circuito. A corrente inicial é nula, pois o indutor se opõe às variações bruscas de corrente. Após essa oposição inicial, a corrente aumenta gradativamente, obedecendo a uma função exponencial, até atingir o valor máximo ($I_{máx}$), quando o indutor estiver totalmente energizado. Nesta situação temos $I_{máx} = \frac{E}{R}$.

A Figura 28.3 indica a variação da corrente em função do tempo.

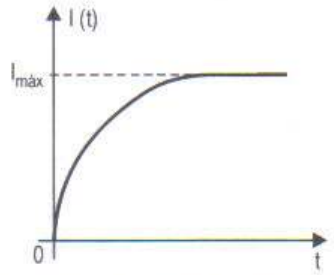


Figura 28.3 - Característica da corrente de energização de um indutor.

A partir desta característica podemos equacionar a corrente em função do tempo e dos componentes do circuito.

$$i(t) = I_{máx}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

em que τ é a constante de tempo do circuito e é igual à relação entre o valor da indutância e o valor da resistência $\left(\tau = \frac{L}{R}\right)$.

Para o circuito da Figura 28.2, podemos escrever que:

$$E = V_R + V_L$$

substituindo a expressão da corrente, temos:

$$E = R \cdot I_{máx}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + V_L$$

sendo:

$$V_L = E - \cancel{R} \cdot \frac{E}{\cancel{R}}\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

Portanto, $V_L = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ que é denominada a equação de carga do indutor.

Por meio da equação podemos levantar a característica do indutor em regime DC, conforme mostra a Figura 28.4.

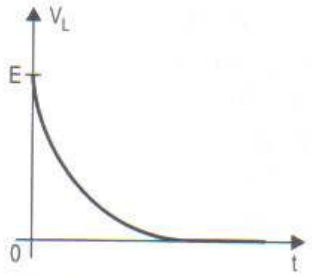


Figura 28.4 - Característica da tensão de carga de um indutor.

Calculando a tensão nos pontos notáveis t = 0, t = τ e t = 5τ, temos:

- Para t = 0

$$V_L = E \cdot e^{-\frac{0}{\tau}}$$

$$V_L = E$$

- Para t = τ

$$V_L = E \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}}$$

$$V_L = 0{,}368E, \text{ ou seja, } V_L = 36{,}8\% \text{ de } E$$

- Para t = 5τ

$$V_L = E \cdot e^{-\frac{5\tau}{\tau}}$$

$$V_L = 0$$

Temos que o indutor energiza-se totalmente em um intervalo de tempo superior a cinco vezes a sua constante de tempo. A Figura 28.5 mostra a curva do indutor com os pontos notáveis.

Estando o indutor energizado, podemos montar um circuito para desenergizá-lo, visto na Figura 28.6.

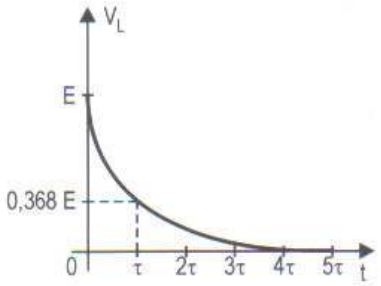


Figura 28.5 - Energização de um indutor.

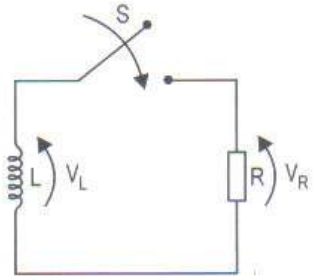


Figura 28.6 - Circuito de desenergização de um indutor.

No instante t = 0, fechamos a chave S do circuito e o indutor inicia o processo de desenergização por meio do resistor R. Nesse instante, a corrente no circuito será máxima, decrescendo exponencialmente até atingir o valor zero, quando o indutor estiver totalmente desenergizado. Essa característica é mostrada na Figura 28.7.

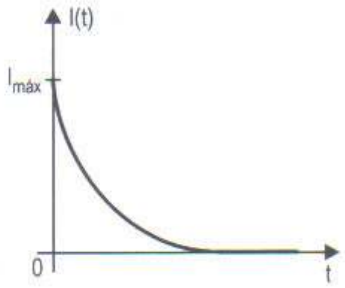


Figura 28.7 - Característica da corrente de desenergização de um indutor.

Equacionando a corrente em função do tempo, temos:

$$I(t) = I_{máx} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

A partir do circuito da Figura 28.6, notamos que:

$$V_L = V_R$$

em que:

$$V_L = R \cdot I(t)$$

$$V_L = R \cdot I_{máx} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

em que:

$$R \cdot I_{máx} = V_{L\,máx}$$

(a tensão atingida pelo indutor durante o processo de energização)

portanto: $$V_L = V_{L\,máx} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

que é denominada equação de descarga do indutor.

Por meio dessa equação, podemos levantar a característica do indutor durante sua desenergização, conforme mostra a Figura 28.8.

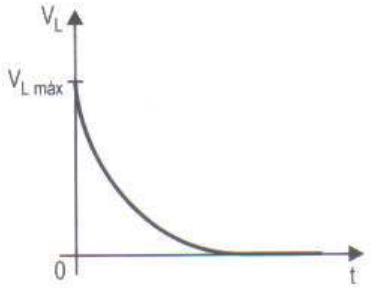


Figura 28.8 - Característica da tensão de descarga de um indutor.

Calculando a tensão do indutor em três pontos notáveis t = 0, t = τ, t = 5τ, temos:

- Para t = 0 $$V_L = V_{L\,máx} \cdot e^{-\frac{0}{\tau}}$$

$$V_L = V_{L\,máx}$$

- Para t = τ $$V_L = V_{L\,máx} \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}}$$

$$V_L = 0{,}368\, V_{L\,máx} \quad \text{ou} \quad V_{L\,máx} \quad \text{ou} \quad V_L = 36{,}8\% \text{ de } V_{L\,máx}$$

- Para t = 5τ $$V_L = V_{L\,máx} \cdot e^{-\frac{5\tau}{\tau}}$$

$$V_L \cong 0$$

Para se desenergizar o indutor necessita de um intervalo de tempo maior que cinco vezes a sua constante de tempo. A Figura 28.9 mostra a curva da descarga do indutor com os pontos notáveis.

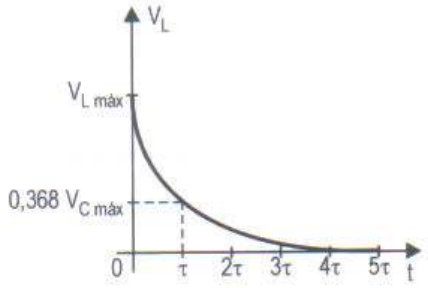


Figura 28.9 - Desenergização de um indutor.

Para exemplificar como mostra a Figura 28.10, vamos aplicar um sinal ao circuito da Figura 28.11 e esboçá-lo no indutor.

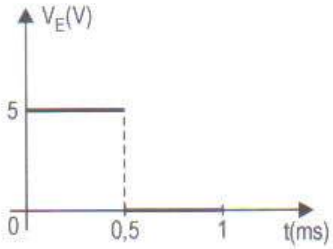


Figura 28.10 - Característica da tensão de entrada.

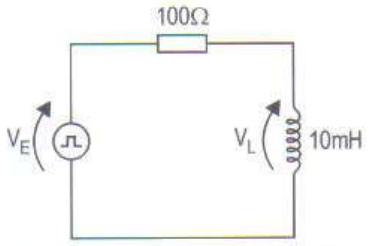


Figura 28.11 - Circuito de carga e descarga de um indutor.

Calculando a constante de tempo, temos:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{100} = 0{,}1\text{ms}$$

No intervalo de tempo de 0 a 0,5ms aplicamos uma tensão de 5V, e como esse intervalo corresponde a cinco vezes a constante de tempo, o indutor energiza-se totalmente e temos no instante t = 0,5ms uma tensão V_L = 0V. A partir desse instante, na variação brusca da tensão de entrada de 5V a 0, surge uma tensão reserva, autoinduzida de valor igual a 5V.

No intervalo de tempo de 0,5ms a 1ms, como a tensão de entrada é nula, o indutor se desenergiza pela fonte. Como esse intervalo também corresponde a cinco vezes a constante de tempo, teremos no instante t = 1ms uma tensão V_L = 0.

Podemos esboçar o gráfico da tensão no indutor conforme a Figura 28.12.

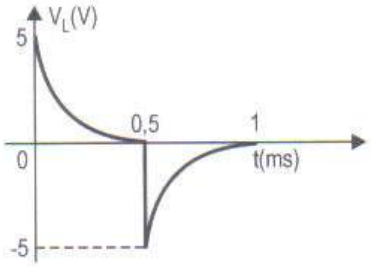
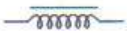


Figura 28.12 - Característica da tensão no indutor.

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Indutor: 10mH.
- Resistores: 470Ω, 1KΩ e 2,2KΩ.

Simbologia

Indutor com núcleo de Ar	
Indutor com núcleo de Ferro	
Indutor com núcleo de Ferrite	

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 28.13. Ajuste o gerador de sinais para onda quadrada, 5Vpp e frequência de 10KHz.

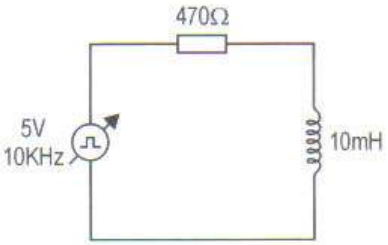


Figura 28.13

2) Meça e anote no Quadro 28.1 a forma de onda no indutor e no resistor.

	Forma de onda	V_{ppmed}
R		
L		

Quadro 28.1

3) Substitua o resistor de 470Ω por outro de 1KΩ. Repita o item 2, preenchendo o Quadro 28.2.

	Forma de onda	V_{ppmed}
R		
L		

Quadro 28.2

4) Substitua o resistor de 1KΩ por outro de 2,2KΩ. Repita o item 2, preenchendo o Quadro 28.3.

	Forma de onda	V_{ppmed}
R		
L		

Quadro 28.3

Exercícios

1) Calcule a constante de tempo para cada caso.

2) Explique as diferenças entre as formas de onda de tensão no indutor, nos três casos.

3) O que obtemos quando medimos um indutor com o ohmímetro?

4) Determine a constante de tempo para o circuito da Figura 28.14.

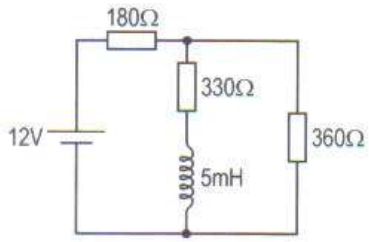


Figura 28.14

5) No circuito da Figura 28.15, a chave S permanece na posição **1** durante 5s. Calcule a tensão no resistor R_2, 1s após a passagem da chave S para a posição **2**.

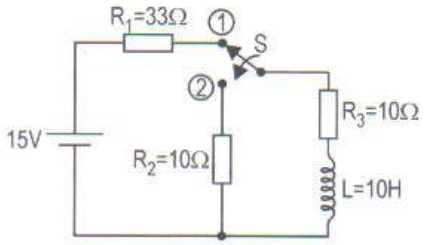


Figura 28.15

EXPERIÊNCIA

29

Capacitor em Regime AC

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, a variação da reatância capacitiva com a frequência.

Teoria

Um capacitor, quando percorrido por uma corrente elétrica alternada, oferece oposição à passagem dela, imposta por campo elétrico, denominada **reatância capacitiva**. Essa reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência da corrente, ao valor do capacitor e é dada pela relação:

$$X_c = \frac{1}{\omega_c} \quad \text{ou} \quad X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

Sendo a reatância capacitiva uma oposição à passagem de corrente, a sua unidade é ohm [Ω].

Da relação $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$ podemos traçar o gráfico da reatância capacitiva em função da frequência, obtendo como resultado a curva mostrada na Figura 29.1.

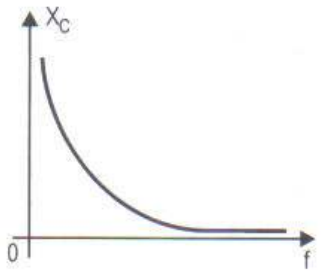


Figura 29.1 - Característica da reatância capacitiva.

Do gráfico concluímos que, à medida que a frequência aumenta, a reatância capacitiva decresce até atingir um valor praticamente nulo.

Como a reatância capacitiva é função da frequência, devemos medi-la por um processo experimental, ou seja, aplicamos uma tensão alternada aos terminais do capacitor, medimos o valor da tensão e da corrente, obtendo assim o seu valor pela relação $X_c = \frac{V_{ef}}{I_{ef}}$.

Aplicando uma tensão alternada nos terminais de um capacitor, como mostra o circuito da Figura 29.2, surge uma corrente alternada, pois o capacitor carrega-se e descarrega-se continuamente em função da característica dessa tensão.

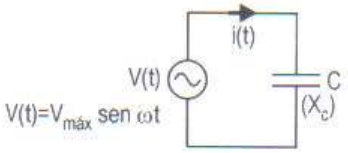


Figura 29.2 - Circuito AC com capacitor.

Lembramos que, quando o capacitor está descarregado ($V_c = 0$), a corrente é máxima e quando carregado ($V_c = V_{máx}$), a corrente é nula. Em função disso podemos representar graficamente essa situação, Figura 29.3.

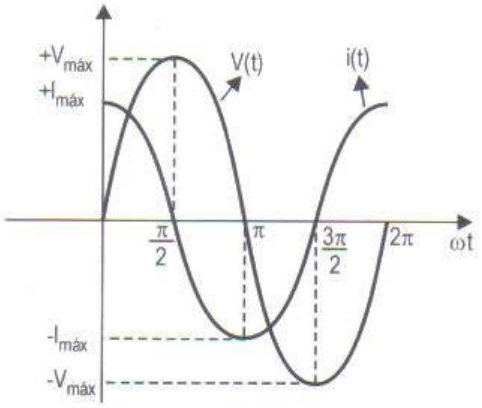


Figura 29.3 - Característica da tensão e da corrente AC de um capacitor.

Observando a Figura 29.3, notamos que a corrente está adiantada de $\frac{\pi}{2}$ rad em relação à tensão, portanto temos que a corrente obedece à equação:

$$i(t) = I_{máx} \operatorname{sen}\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

em que:

$$I_{máx} = \frac{V_{máx}}{X_c}$$

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Capacitor: 0,1μF.
- Resistor: 1KΩ.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 29.4. Ajuste a frequência do gerador de sinais para 10KHz.

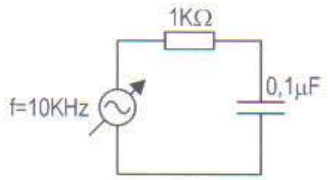


Figura 29.4

2) Ajuste a tensão do gerador de sinais para obter no resistor as tensões marcadas no Quadro 29.1. Para cada caso meça e anote a tensão pico a pico no capacitor.

V_{Rpp} (V)	1	2	3	4	5
V_{Ref} (V)					
I_{ef} (mA)					
V_{cpp} (V)					
V_{cef} (V)					
X_C (Ω)					

Quadro 29.1

3) Ajuste o gerador de sinais para $1V_{pp}$, mantendo-a constante a cada medida. Varie a frequência de acordo com o Quadro 29.2. Meça e anote para cada caso o valor da tensão pico a pico no resistor e no capacitor.

f(KHz)	V_{Rpp} (V)	V_{Ref} (V)	V_{cpp} (V)	V_{cef} (V)	I_{ef} (mA)	X_c (Ω)
1						
2						
3						

f(KHz)	V_{Rpp} (V)	V_{Ref} (V)	V_{cpp} (V)	V_{cef} (V)	I_{ef} (mA)	X_c (Ω)
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Quadro 29.2

Exercícios

1) Calcule V_{Ref} e V_{cef}, preenchendo o Quadro 29.1.

2) Calcule $I_{ef} = \frac{V_{Ref}}{R}$, preenchendo o Quadro 29.1.

3) Calcule $X_C = \frac{V_{cef}}{I_{ef}}$, preenchendo o Quadro 29.1.

4) Repita as questões anteriores, preenchendo o Quadro 29.2.

5) Calcule $X_c = \frac{1}{2\pi f C}$ e compare com os valores obtidos no Quadro 29.1.

6) Com os valores do Quadro 29.2 construa o gráfico $X_c = f(f)$.

7) No circuito da Figura 29.5 a tensão eficaz é 12V. Determine o valor da tensão instantânea quando o da corrente for igual a 0,32mA.

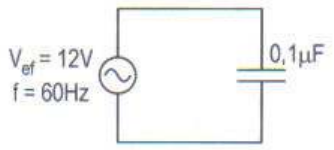


Figura 29.5

EXPERIÊNCIA

30

Indutor em Regime AC

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, a variação da reatância indutiva com a frequência.

Teoria

Um indutor, quando percorrido por uma corrente elétrica alternada, oferece uma oposição à passagem dela, imposta por campo magnético, denominada **reatância indutiva**. Essa reatância indutiva é diretamente proporcional à frequência da corrente, ao valor do indutor e é dada pela relação $X_L = \omega_L$ ou $X_L = 2\pi fL$.

Sendo a reatância indutiva uma oposição à passagem de corrente, a sua unidade é o ohm [Ω]. Da relação $X_L = 2\pi fL$ podemos traçar o gráfico da reatância indutiva em função da frequência, obtendo como resultado a curva mostrada na Figura 30.1.

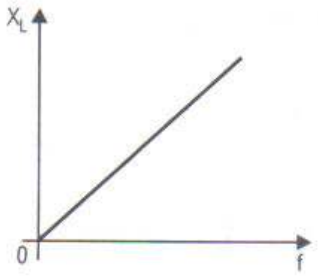


Figura 30.1 - Característica da reatância indutiva.

Do gráfico concluímos que a reatância indutiva aumenta com a frequência.

Como a reatância indutiva é função da frequência, devemos medi-la por um processo experimental, ou seja, aplicamos uma tensão alternada aos terminais do indutor, medimos o valor da tensão e da corrente, obtendo assim o seu valor pela relação $X_L = \frac{V_{ef}}{I_{ef}}$.

Aplicando uma tensão alternada nos terminais de um indutor, como mostra o circuito da Figura 30.2, surge uma corrente alternada, pois o indutor energiza-se e desenergiza-se continuamente em função da característica dessa tensão.

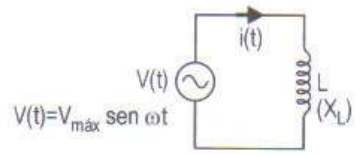


Figura 30.2 - Circuito AC com indutor.

Quando o indutor está energizado ($V_L = 0$), a corrente é máxima e negativa, e quando o indutor está desenergizado ($V_L = V_{máx}$), a corrente é nula. Em função disso, podemos representar graficamente essa situação, conforme indica a Figura 30.3.

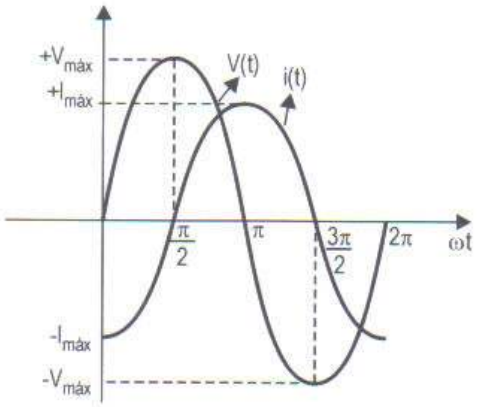


Figura 30.3 - Característica da tensão e da corrente AC de um indutor.

Observando a Figura 30.3, notamos que a corrente está atrasada de $\frac{\pi}{2}$ rad em relação à tensão, portanto temos que a corrente obedece à equação.

$$i(t) = I_{máx}\ \text{sen}\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

sendo:

$$I_{máx} = \frac{V_{máx}}{X_L}$$

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Indutor: 10mH.
- Resistor: 1KΩ.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 30.4. Ajuste a frequência do gerador de sinais para 10KHz.

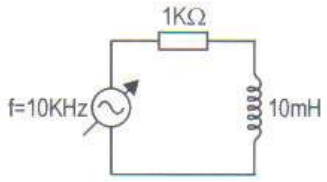


Figura 30.4

2) Ajuste a tensão do gerador de sinais para obter no resistor as tensões marcadas no Quadro 30.1. Para cada caso meça e anote a tensão pico a pico no indutor.

V_{Rpp} (V)	1	2	3	4	5
V_{Ref} (V)					
I_{ef} (mA)					
V_{Lpp} (V)					
V_{Lef} (V)					
X_L (Ω)					

Quadro 30.1

3) Ajuste o gerador de sinais para $1V_{pp}$, mantendo-a constante a cada medida. Varie a frequência de acordo com o Quadro 30.2. Meça e anote para cada caso o valor da tensão pico a pico no resistor e no indutor.

f(KHz)	V_{Rpp} (V)	V_{Ref} (V)	V_{Lpp} (V)	V_{Lef} (V)	I_{ef} (mA)	X_L (Ω)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

Quadro 30.2

1) Calcule V_{Ref} e V_{Lef}, preenchendo o Quadro 30.1.

2) Calcule $I_{ef} = \frac{V_{Ref}}{R}$, preenchendo o Quadro 30.1.

3) Calcule $X_L = \frac{V_{Lef}}{I_{ef}}$, preenchendo o Quadro 30.1.

4) Repita as questões anteriores, preenchendo o Quadro 30.2.

5) Calcule $X_L = 2\pi fL$ e compare com os valores obtidos no Quadro 30.1.

6) Com os valores do Quadro 30.2 construa o gráfico $X_L = f(f)$.

7) No circuito da Figura 30.5, a tensão eficaz é 70mA. Determine o valor instantâneo da corrente quando o da tensão for 5V.

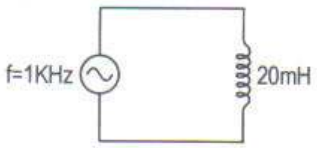


Figura 30.5

EXPERIÊNCIA

31

Circuito RC-Série

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o comportamento de um circuito RC-Série.

Teoria

Todo circuito em regime AC oferece uma oposição à passagem de corrente elétrica denominada **impedância (Z)** e cuja unidade é ohms (Ω). Quando no circuito houver elementos reativos, a corrente estará defasada em relação à tensão. Nestes casos, para a devida análise do circuito deve-se construir o diagrama vetorial e obter as relações.

Um dos circuitos, composto por um resistor em série com um capacitor, denominado RC-Série, é visto na Figura 31.1.

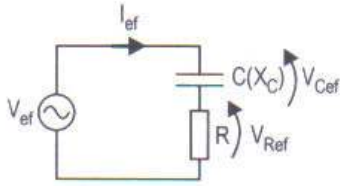


Figura 31.1 - Circuito RC-Série.

Na construção do diagrama vetorial da Figura 31.2 consideramos como referência a corrente, pois sendo um circuito série, esta é a mesma em todos os componentes, lembrando que no resistor a tensão e a corrente estão em fase e no capacitor a corrente está adiantada de $\pi/2$ radianos.

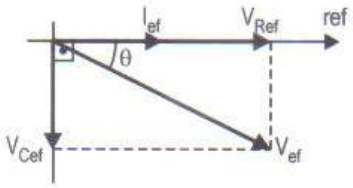


Figura 31.2 - Diagrama vetorial de um circuito RC-Série.

Do diagrama temos que a soma vetorial das tensões do resistor e do capacitor é igual à da tensão da fonte. Assim sendo, podemos escrever:

$$V_{ef}^2 = V_{Ref}^2 + V_{Cef}^2$$

dividindo todos os termos por I_{ef}^2, temos:

$$\left(\frac{V_{Ref}}{I_{ef}}\right)^2 = \left(\frac{V_{Ref}}{I_{ef}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Cef}}{I_{ef}}\right)^2$$

em que: $\frac{V_{ef}}{I_{ef}} = Z, \quad \frac{V_{Ref}}{I_{ef}} = R \quad e \quad \frac{V_{Cef}}{I_{ef}} = X_c$

portanto, podemos escrever $Z^2 = R^2 + X_c^2$ ou $Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$ que é o valor da impedância do circuito.

O ângulo θ é a defasagem entre a tensão e a corrente no circuito e pode ser determinado por meio das relações trigonométricas do triângulo retângulo, em que:

$$\operatorname{sen}\theta = \frac{V_{Cef}}{V_{ef}} = \frac{X_c}{Z}$$

$$\cos\theta = \frac{V_{Ref}}{V_{ef}} = \frac{R}{Z}$$

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{V_{Cef}}{V_{Ref}} = \frac{X_c}{R}$$

Considerando a defasagem, podemos escrever as equações da corrente e da tensão em cada elemento do circuito.

$$V(t) = V_{máx} \cdot \operatorname{sen}\ \omega t$$

$$i(t) = I_{máx} \cdot \operatorname{sen}\ (\omega t + \theta)$$

$$V_R(t) = V_{R\,máx} \cdot \operatorname{sen}\ (\omega t + \theta)$$

$$V_c(t) = V_{C\,máx} \cdot \operatorname{sen}\ (\omega t + \theta - \frac{\pi}{2})$$

Para exemplificar, vamos esboçar o diagrama vetorial do circuito da Figura 31.3.

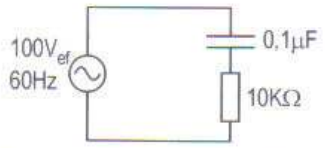


Figura 31.3 - Circuito RC-Série.

1) Cálculo da reatância capacitiva:

$$X_c = \frac{1}{2\pi\, fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}} = 26{,}53K\Omega$$

2) Cálculo da impedância:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2}$$

$$Z = \sqrt{(10 \cdot 10^3)^2 + (26{,}53 \cdot 10^3)^2} = 28{,}35K\Omega$$

3) Cálculo da corrente eficaz:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{100}{28{,}35 \cdot 10^3}$$

$$I_{ef} = 3{,}5mA$$

4) Cálculo da tensão no resistor:

$$V_{Ref} = R \cdot I_{ef}$$

$$V_{Ref} = 10 \cdot 10^3 \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{Ref} = 35V$$

5) Cálculo da tensão no capacitor:

$$V_{Cef} = X_c \cdot I_{ef}$$

$$V_{Cef} = 26{,}53 \cdot 10^3 \cdot 3{,}5 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{Cef} = 92{,}8\,V$$

6) Cálculo do ângulo de defasagem:

$$\theta = \text{arc sen} \frac{X_C}{Z}$$

$$\theta = \text{arc sen} \frac{26{,}53 \cdot 10^3}{28{,}35 \cdot 10^3}$$

$$\theta = 69{,}3°$$

7) Diagrama vetorial:

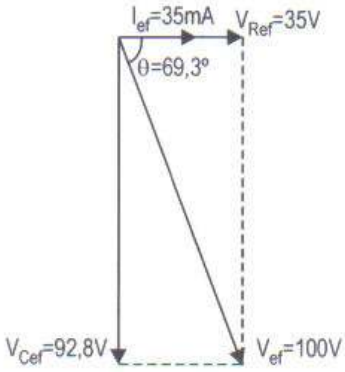


Figura 31.4

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Capacitor: 0,01μF.
- Resistor: 33KΩ.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 31.5. Ajuste o gerador de sinais para $5V_{pp}$, onda senoidal.

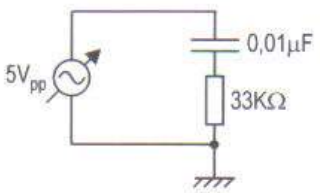


Figura 31.5

2) Varie a frequência do gerador de sinais, conforme o Quadro 31.1. Para cada valor ajustado meça e anote a tensão pico a pico em cada componente.

f(Hz)	V_{Rpp}	V_{Ref}	V_{Cpp}	V_{Cef}
100				
200				
400				
600				
800				
1000				

Quadro 31.1

3) Utilizando o mesmo circuito, ligado ao osciloscópio conforme a Figura 31.6, meça os valores de 2a e 2b para as frequências do Quadro 31.2.

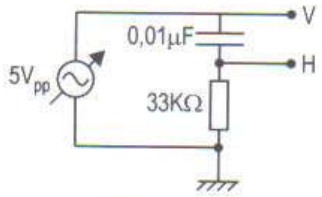


Figura 31.6

f(Hz)	2a	2b	Δθ
100			
200			
400			
600			
800			
1000			

Quadro 31.2

Exercícios

1) Calcule o valor eficaz das tensões no resistor e no capacitor, preenchendo o Quadro 31.1.

2) Calcule a defasagem entre tensão e corrente no circuito da Figura 31.5, preenchendo o Quadro 31.2.

3) Construa o gráfico de $\Delta\theta = f(f)$ com os valores do Quadro 31.2.

4) Calcule para a frequência de 400Hz e amplitude $5V_{pp}$ a tensão no resistor e no capacitor, para o circuito da Figura 31.5. Compare com os valores medidos.

5) Para o mesmo caso, calcule a defasagem entre tensão e corrente no circuito, comparando com o valor obtido no Quadro 31.2. Esboce o diagrama vetorial.

6) Utilizando a ligação ao osciloscópio, conforme o item 3 da parte prática, estamos medindo a defasagem entre tensão e corrente no circuito. Por quê?

7) Como você ligaria o osciloscópio ao circuito da Figura 31.5 para medir defasagem entre tensão da fonte e tensão do capacitor? E para medir a defasagem entre a tensão no resistor e no capacitor?

EXPERIÊNCIA

32

Circuito RL-Série

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o comportamento de um circuito RL-Série.

Teoria

O circuito RL-Série é composto por um resistor em série com um indutor, conforme mostra a Figura 32.1.

Na construção do diagrama vetorial visto na Figura 32.2 consideramos como referência a corrente, pois sendo um circuito série, ela é a mesma em todos os componentes e no indutor está atrasada de $\pi/2$ radianos.

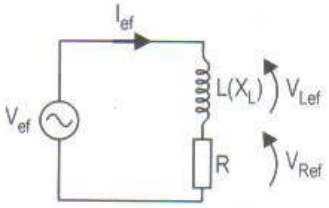


Figura 32.1 - Circuito RL-Série.

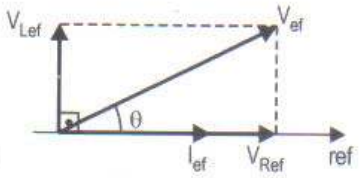


Figura 32.2 - Diagrama vetorial de um circuito RL-Série.

Do diagrama temos que a soma vetorial das tensões do resistor e do indutor é igual à da tensão da fonte. Assim sendo, podemos escrever:

$$V_{ef}^2 = V_{Ref}^2 + V_{Lef}^2$$

dividindo todos os termos por I_{ef}^2, temos:

$$\left(\frac{V_{ef}}{I_{ef}}\right)^2 = \left(\frac{V_{Ref}}{I_{ef}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Lef}}{I_{ef}}\right)^2$$

em que: $\frac{V_{ef}}{I_{ef}} = Z,\ \frac{V_{Ref}}{I_{ef}} = R \quad e \quad \frac{V_{Lef}}{I_{ef}} = X_L$

portanto, podemos escrever $Z^2 = R^2 + X_L^2$ ou $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ que é o valor da impedância do circuito.

O ângulo θ é a defasagem entre a tensão e a corrente no circuito e pode ser determinado por meio das relações trigonométricas do triângulo retângulo.

$$\text{sen } \theta = \frac{V_{Lef}}{V_{ef}} = \frac{X_L}{Z}$$

$$\cos \theta = \frac{V_{Ref}}{V_{ef}} = \frac{R}{Z}$$

$$\text{tg } \theta = \frac{V_{Lef}}{V_{Ref}} = \frac{X_L}{R}$$

Considerando a defasagem, podemos escrever as equações da corrente e da tensão em cada elemento do circuito.

$$v(t) = V_{máx} \text{ sen } \omega t$$

$$i(t) = I_{máx} \text{ sen } (\omega t - \theta)$$

$$v_R(t) = v_{R\,máx} \text{ sen } (\omega t - \theta)$$

$$v_L(t) = V_{L\,máx} \cdot \text{sen}\left(\omega t - \theta + \frac{\pi}{2}\right)$$

Para exemplificar, vamos esboçar o diagrama vetorial do circuito da Figura 32.3.

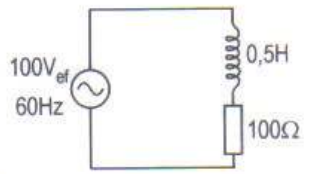


Figura 32.3 - Circuito RL-Série.

1) Cálculo da reatância indutiva:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 60 \cdot 0{,}5 = 188{,}5\Omega$$

2) Cálculo da impedância:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{(100)^2 + (188,5)^2} = 213,4\Omega$$

3) Cálculo da corrente eficaz:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{100}{213,4} = 0,47\,A$$

4) Cálculo da tensão no resistor:

$$V_{Ref} = R \cdot I_{ef}$$

$$V_{Ref} = 100 \cdot 0,47$$

$$V_{Ref} = 47V$$

5) Cálculo da tensão no indutor:

$$V_{Lef} = X_L \cdot I_{ef}$$

$$V_{Lef} = 188,5 \cdot 0,47$$

$$V_{Lef} = 88,3V$$

6) Cálculo do ângulo de defasagem:

$$\theta = \text{arc sen}\ \frac{X_L}{Z}$$

$$\theta = \text{arc sen}\ \frac{188,5}{213,4}$$

$$\theta = 62°$$

7) Diagrama vetorial:

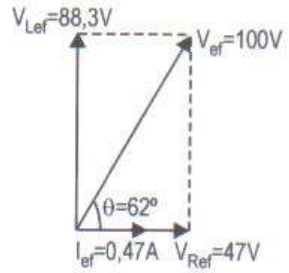


Figura 32.4

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Indutor: 10 mH.
- Resistor: 4,7KΩ.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 32.5. Ajuste o gerador de sinais para $5V_{pp}$, onda senoidal.

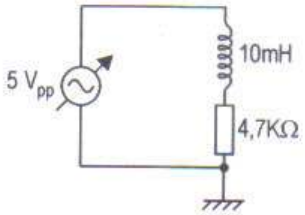


Figura 32.5

2) Varie a frequência do gerador de sinais, conforme o Quadro 32.1. Para cada valor ajustado meça e anote a tensão pico a pico em cada componente.

f(KHz)	V_{Rpp}	V_{Ref}	V_{Lpp}	V_{Lef}
10				
20				
40				
60				
80				
100				

Quadro 32.1

3) Utilizando o mesmo circuito, ligado ao osciloscópio conforme a Figura 32.6, meça e anote os valores de 2a e 2b para as frequências do Quadro 32.2.

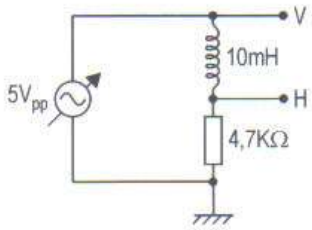


Figura 32.6

f(KHz)	2a	2b	Δθ
10			
20			
40			
60			
80			
100			

Quadro 32.2

Exercícios

1) Calcule o valor eficaz das tensões no resistor e no indutor, preenchendo o Quadro 32.1.

2) Calcule a defasagem entre tensão e corrente no circuito da Figura 32.5, preenchendo o Quadro 32.2.

3) Levante o gráfico de $\Delta\theta = f(f)$ com os valores do Quadro 32.2.

4) Calcule para a frequência de 60KHz e amplitude de $5V_{pp}$ a tensão no resistor e no indutor para o circuito da Figura 32.5. Compare com os valores medidos.

5) Para o mesmo caso, calcule a defasagem entre tensão e corrente no circuito, comparando com o valor obtido no Quadro 32.2. Esboce o diagrama vetorial.

EXPERIÊNCIA

33

Circuito RLC-Série

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o comportamento de um circuito RLC-Série.

Teoria

O circuito RLC-Série é composto por um resistor, um capacitor e um indutor, associados em série, conforme mostra a Figura 33.1.

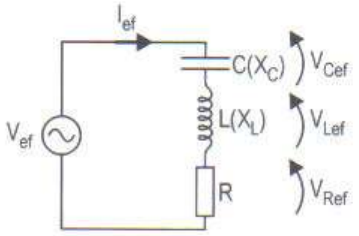


Figura 33.1 - Circuito RLC-Série.

Na construção do diagrama vetorial visto na Figura 33.2 consideramos como referência a corrente, e neste caso ela está adiantada de $\pi/2$ rad em relação à tensão no capacitor e atrasada de $\pi/2$ rad em relação à tensão no indutor.

Para fins de diagrama vetorial, utiliza-se a resultante, pois os vetores que representam a tensão no capacitor e a tensão no indutor têm a mesma direção e sentidos opostos, condizentes com os efeitos capacitivos e indutivos.

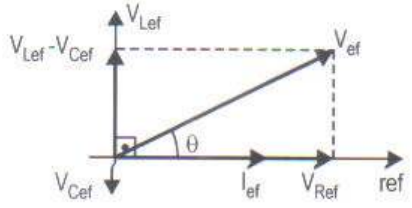


Figura 33.2 - Diagrama vetorial de um circuito RLC-Série com características indutivas.

Observando o diagrama, notamos que V_{Lef} é maior que V_{Cef}, portanto temos como resultante um vetor $(V_{Lef} - V_{Cef})$, determinando um circuito com características indutivas, ou seja, com a corrente atrasada em relação à tensão.

No caso de termos V_{Cef} maior que V_{Lef}, obteremos um circuito com características capacitativas, ou seja, com a corrente adiantada em relação à tensão, resultando num diagrama vetorial, como mostra a Figura 33.3.

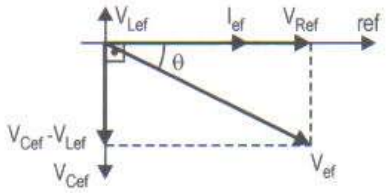


Figura 33.3 - Diagrama vetorial de um circuito RLC-Série com características capacitativas.

Do diagrama da Figura 33.2 temos que a soma vetorial da resultante com a do resistor é igual à da tensão da fonte.

Assim sendo, podemos escrever:

$$V_{ef}^2 = V_{Ref}^2 + (V_{Lef} - V_{Cef})^2$$

dividindo todos os termos por I_{ef}^2, temos:

$$\left(\frac{V_{ef}}{I_{ef}}\right)^2 = \left(\frac{V_{Ref}}{I_{ef}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Lef}}{I_{ef}} - \frac{V_{Cef}}{I_{ef}}\right)^2$$

em que: $\frac{V_{ef}}{I_{ef}} = Z$, $\frac{V_{Ref}}{I_{ef}} = R$, $\frac{V_{Lef}}{I_{ef}} = X_L$ e $\frac{V_{Cef}}{I_{ef}} = X_c$

portanto, podemos escrever $Z^2 = R^2 + (X_L - X_c)^2$ ou $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}$ que é o valor da impedância do circuito.

O ângulo θ é a defasagem entre a tensão e a corrente no circuito e pode ser determinado por meio das relações trigonométricas do triângulo retângulo:

$$\text{sen } \theta = \frac{V_{Lef} - V_{Cef}}{V_{ef}} = \frac{X_L - X_c}{Z}$$

$$\cos \theta = \frac{V_{Ref}}{V_{ef}} = \frac{R}{Z}$$

$$\text{tg } \theta = \frac{V_{Lef} - V_{Cef}}{V_{Ref}} = \frac{X_L - X_c}{R}$$

Como o circuito RLC-Série pode ter comportamento capacitivo ou indutivo, vamos sobrepor suas reatâncias, construindo o gráfico da Figura 33.4.

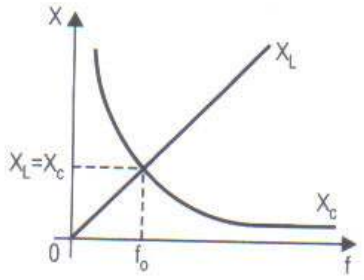


Figura 33.4 - Curvas das reatâncias em função da frequência.

Do gráfico da Figura 33.4 temos que para frequências menores que f_o, X_c é maior que X_L e o circuito tem características capacitativas, como já visto. Para frequências maiores que f_o, X_L é maior que X_c e o circuito tem características indutivas. Na frequência f_o, temos que X_c é igual a X_L, ou seja, o efeito capacitivo é igual ao efeito indutivo. Como esses efeitos são opostos, um anula o outro, apresentando o circuito características puramente resistivas.

Este fato pode ser observado utilizando a relação para cálculo da impedância:

$$Z=\sqrt{R^2+(X_L-X_c)^2} \text{ como } X_L=X_c, \text{ temos que } Z = R$$

Como neste caso o circuito possui características resistivas, tensão e corrente estão em fase, assim sendo o ângulo θ é igual a zero.

Como a frequência f_o anula os efeitos reativos, é denominada frequência de ressonância e pode ser determinada igualando as reatâncias indutiva e capacitativa:

$$f=f_o \quad \rightarrow \quad X_L=X_c$$

$$2\pi f_o L=\frac{1}{2\pi f_o C}$$

$$(2\pi f_o)^2 LC=1$$

$$f_o=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

A partir do estudo feito podemos levantar o gráfico da impedância em função da frequência para o circuito RLC-Série. Esse gráfico é visto na Figura 33.5.

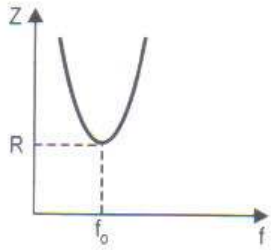


Figura 33.5 - Característica da impedância de um circuito RLC-Série.

Pelo gráfico observamos que a mínima impedância ocorre na frequência de ressonância e esta é igual ao valor da resistência.

Podemos também levantar a curva da corrente em função da frequência para o mesmo circuito. Essa curva é vista na Figura 33.6.

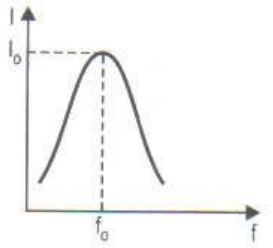


Figura 33.6 - Característica da corrente de um circuito RLC-Série.

Pelo gráfico observamos que para a frequência de ressonância a corrente é máxima (I_o), pois a impedância é mínima (Z = R).

Quando no circuito RLC-série tivermos o valor da resistência igual ao valor da reatância equivalente (X_L - X_c), podemos afirmar que a tensão no resistor (V_R) é igual à tensão na reatância equivalente (V_L - V_c). A partir disso, podemos escrever:

$$V_{ef}^2 = V_{Ref}^2 + (V_{Lef} - V_{Cef})^2$$

como:

$$V_{Ref} = V_{Lef} - V_{Cef}$$

temos:

$$V_{ef}^2 = V_{Ref}^2 + V_{Ref}^2$$

ou

$$V_{ef}^2 = 2V_{Ref}^2 \quad \therefore \quad V_{ef} = \sqrt{2} \cdot V_{Ref}$$

dividindo por R, temos:

$$\frac{V_{ef}}{R} = \sqrt{2} \cdot \frac{V_{Ref}}{R}$$

como $\frac{V_{ef}}{R}$ representa o valor de Io, ou seja, a corrente do circuito na frequência de ressonância, e $\frac{V_r}{R}$ a corrente no circuito na situação da reatância equivalente e igual à resistência, podemos relacioná-las:

$$I_o = \sqrt{2} \cdot I \quad \text{ou} \quad I = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$$

Esse valor de corrente pode ocorrer em duas frequências de valores distintos, sendo denominadas, respectivamente, **frequência de corte inferior** (f_{Ci}) e **frequência de corte superior** (f_{Cs}). A Figura 33.7 exibe o gráfico da corrente em função da frequência com esses pontos transpostos.

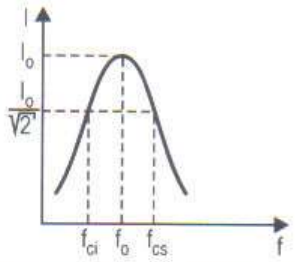


Figura 33.7 - Características da corrente de um circuito RLC.

A faixa de frequências, compreendida entre a frequência de corte inferior e a frequência de corte superior, é denominada **largura de banda**, podendo ser expressa por $L.B. = f_{cs} - f_{ci}$.

Para exemplificar, vamos esboçar o diagrama vetorial do circuito da Figura 33.8.

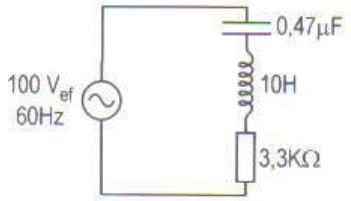


Figura 33.8 - Circuito RLC-Série.

1) Cálculo das reatâncias:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 0{,}47 \cdot 10^{-6}} = 5644\Omega$$

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 60 \cdot 10 = 3770\Omega$$

2) Cálculo da impedância:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_c - X_L)^2}$$

$$Z = \sqrt{(3{,}3 \cdot 10^3)^2 + (5644 - 3770)^2}$$

$$Z = 3795\Omega$$

3) Cálculo da corrente eficaz:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{100}{3795} = 26{,}4\,mA$$

4) Cálculo das tensões:

$$V_{Cef} = X_c \cdot I_{ef} = 5644 \cdot 26{,}4 \cdot 10^{-3} = 148{,}7V$$

$$V_{Lef} = X_L \cdot I_{ef} = 3770 \cdot 26{,}4 \cdot 10^{-3} = 99{,}3V$$

$$V_{Ref} = R \cdot I_{ef} = 3{,}3 \cdot 10^{-3} \cdot 26{,}4 \cdot 10^{-3} = 87V$$

5) Cálculo do ângulo de defasagem:

$$\theta = \text{arc sen}\ \frac{V_{Cef} - V_{Lef}}{V_{ef}}$$

$$\theta = \text{arc sen}\ \frac{148{,}7 - 99{,}3}{100}$$

$$\theta = 29{,}6°$$

6) Diagrama vetorial:

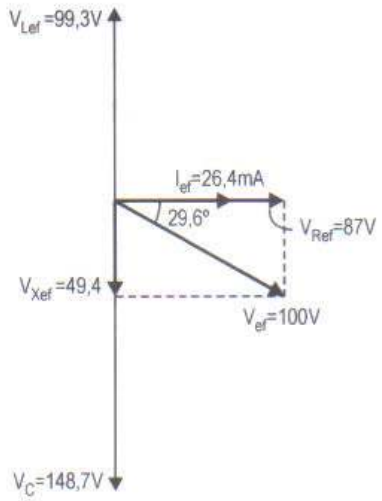


Figura 33.9

O circuito da Figura 33.8 na frequência de 60Hz apresenta características capacitivas. A seguir, vamos calcular as tensões, considerando que ao circuito seja aplicada a mesma tensão, porém na frequência de ressonância:

1) Cálculo da frequência de ressonância:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{10 \cdot 0{,}47 \cdot 10^{-6}}} = 73{,}41\text{Hz}$$

2) Cálculo das reatâncias em f_o:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_o C} = \frac{1}{2\pi \cdot 73{,}41 \cdot 0{,}47 \cdot 10^{-6}} = 4613\Omega$$

$$X_L = 2\pi f_o L = 2\pi \cdot 73{,}41 \cdot 10 = 4613\Omega$$

3) Cálculo da impedância:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_c - X_L)^2}$$

$$Z = \sqrt{(3{,}3 \cdot 10^3)^2 + (4613 - 4613)^2}$$

$$Z = 3{,}3\text{K}\Omega$$

4) Cálculo da corrente eficaz:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{100}{3{,}3 \cdot 10^3} = 30{,}3\text{mA}$$

5) Cálculo das tensões:

$$V_{Cef} = X_c I_{ef} = 4613 \cdot 30{,}3 \cdot 10^{-3} = 139{,}8\text{V}$$

$$V_{Lef} = X_L I_{ef} = 4613 \cdot 30{,}3 \cdot 10^{-3} = 139{,}8\text{V}$$

$$V_{Ref} = R I_{ef} = 3{,}3 \cdot 10^3 \cdot 30{,}3 \cdot 10^{-3} = 100\text{V}$$

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Capacitor: 0,01μF.
- Indutor: 10mH.
- Resistor: 1KΩ.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 33.10. Ajuste o gerador de sinais para $5V_{pp}$, onda senoidal.

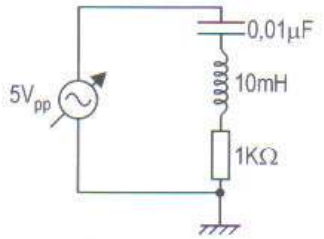


Figura 33.10

2) Varie a frequência do gerador de sinais, conforme o Quadro 33.1, mantendo sua tensão de saída em $5V_{pp}$ para cada valor de frequência, medindo e anotando a tensão pico a pico no resistor.

f(KHz)	V_{Rpp}(V)	V_{Ref}(V)	I_{ef} (mA)	Z(KΩ)
2				
4				
6				
8				
10				
12				
14				
16				
18				
20				
22				
24				
26				
28				
30				

Quadro 33.1

3) Utilizando o mesmo circuito ligado ao osciloscópio, conforme a Figura 33.11, meça e anote os valores de 2a e 2b para as frequências do Quadro 33.2.

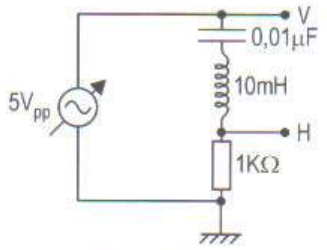


Figura 33.11

f(KHz)	2a	2b	Δθ
2			
4			
6			
8			
10			
12			
14			
16			
18			
20			
22			
24			
26			
28			
30			

Quadro 33.2

4) Para o circuito da Figura 33.11 varie a frequência do gerador de sinais até obter 2a = 0. Anote o valor dessa frequência no Quadro 33.3.

f_o (KHz)	

Quadro 33.3

1) Calcule o valor eficaz da tensão do resistor, preenchendo o Quadro 33.1.

2) Calcule o valor eficaz das correntes utilizando $I_{ef} = \frac{V_{Ref}}{R}$, preenchendo o Quadro 33.1.

3) Calcule a impedância para cada caso utilizando $Z = \frac{V_{ef}}{I_{ef}}$, preenchendo o Quadro 33.1.

4) Calcule a defasagem entre tensão e corrente no circuito da Figura 33.10, preenchendo o Quadro 33.2.

5) Construa os gráficos $Z = f(f)$, $I_{ef} = f(f)$ e $\Delta\theta = f(f)$.

6) Determine a frequência de ressonância e as frequências de corte inferior e superior no gráfico $I_{ef} = f(f)$.

7) A partir dos dados obtidos na questão anterior, determine a largura de banda.

8) Calcule V_{Ref}, V_{Lef} e V_{Cef} na frequência de ressonância para o circuito da Figura 33.12.

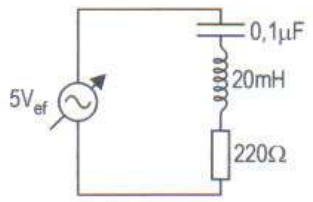


Figura 33.12

EXPERIÊNCIA

34

Circuito RC-Paralelo

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o comportamento de um circuito RC-Paralelo.

Teoria

O circuito RC-Paralelo é composto por um resistor em paralelo com um capacitor, conforme mostra a Figura 34.1.

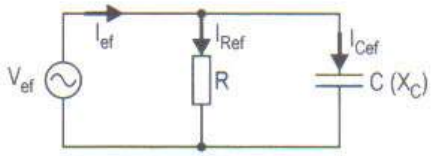


Figura 34.1 - Circuito RC-Paralelo.

Na construção do diagrama vetorial visto na Figura 34.2 consideramos como referência a tensão, pois sendo um circuito paralelo, ela é a mesma em todos os componentes e no capacitor está atrasada de $\frac{\pi}{2}$ radianos em relação à corrente.

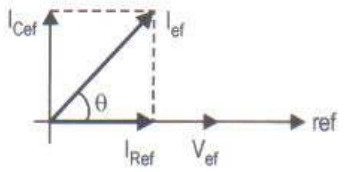


Figura 34.2 - Diagrama vetorial de um circuito RC-Paralelo.

Do diagrama temos que a soma vetorial das correntes do resistor e do capacitor é igual à corrente total do circuito. Assim sendo, podemos escrever:

$$I_{ef}^2 = I_{Ref}^2 + I_{Cef}^2$$

dividindo todos os termos por V_{ef}^2, temos:

$$\left(\frac{I_{ef}}{V_{ef}}\right)^2 = \left(\frac{I_{Ref}}{V_{ef}}\right)^2 + \left(\frac{I_{Cef}}{V_{ef}}\right)^2$$

em que: $\frac{I_{ef}}{V_{ef}} = \frac{1}{Z}$, $\frac{I_{Ref}}{V_{ef}} = \frac{1}{R}$ e $\frac{I_{Cef}}{V_{ef}} = \frac{1}{X_c}$

portanto, podemos escrever $\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_c^2}$ ou $Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{X_c^2}}}$ que é o valor da impedância do circuito.

O ângulo θ é a defasagem entre a tensão e a corrente no circuito e pode ser determinado por meio das relações trigonométricas do triângulo retângulo:

$$\text{sen } \theta = \frac{I_{Cef}}{I_{ef}} = \frac{\frac{1}{X_c}}{\frac{1}{Z}} = \frac{Z}{X_c}$$

$$\cos \theta = \frac{I_{Ref}}{I_{ef}} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{Z}} = \frac{Z}{R}$$

$$\text{tg } \theta = \frac{I_{Cef}}{I_{Ref}} = \frac{\frac{1}{X_c}}{\frac{1}{R}} = \frac{R}{X_c}$$

Para exemplificar, vamos esboçar o diagrama vetorial do circuito da Figura 34.3:

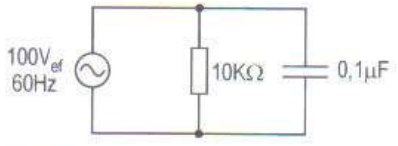


Figura 34.3 - Circuito RC-Paralelo.

1) Cálculo da reatância capacitiva:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 0{,}1 \cdot 10^{-6}} = 26{,}53K\Omega$$

2) Cálculo da impedância:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(10 \cdot 10^3)^2} + \frac{1}{(26{,}53 \cdot 10^3)^2}}}$$

$$Z = 9{,}36K\Omega$$

3) Cálculo da corrente eficaz:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{100}{9{,}36 \cdot 10^3} = 10{,}7\,mA$$

4) Cálculo da corrente eficaz no resistor:

$$I_{Ref} = \frac{V_{ef}}{R} = \frac{100}{10 \cdot 10^3} = 10mA$$

5) Cálculo da corrente eficaz no capacitor:

$$I_{Cef} = \frac{V_{ef}}{X_c} = \frac{100}{26{,}53 \cdot 10^3} = 3{,}8\,mA$$

6) Cálculo do ângulo de defasagem:

$$\theta = \text{arc sen} \frac{Z}{X_c}$$

$$\theta = \text{arc sen} \frac{9{,}36 \cdot 10^3}{26{,}53 \cdot 10^3}$$

$$\theta = 20{,}7°$$

7) Diagrama vetorial:

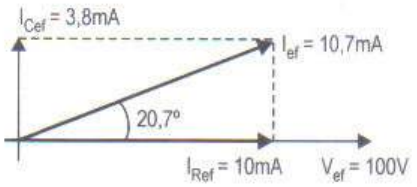


Figura 34.4

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Resistor: 100Ω e 33KΩ.
- Capacitor: 0,01μF.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 34.5. Ajuste o gerador de sinais para $5V_{pp}$, onda senoidal.

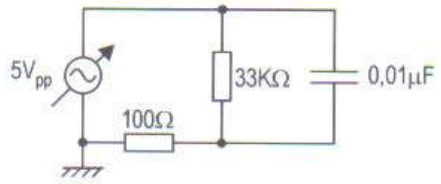


Figura 34.5

Observação: *O resistor de 100Ω possibilita medir de forma indireta a corrente total no circuito, sendo seu valor desprezível em comparação com a impedância do circuito.*

2) Varie a frequência do gerador de sinais, conforme o Quadro 34.1. Para cada valor ajustado meça e anote a tensão pico a pico no resistor de 100Ω (V_1).

f(KHz)	V_{1pp}	V_{1ef}	I_{ef}	Z
100				
200				
400				
600				
800				
1000				

Quadro 34.1

Exercícios

1) Calcule o valor eficaz das tensões do resistor de 100Ω, preenchendo o Quadro 34.1.

2) Calcule o valor eficaz das correntes no circuito, utilizando $I_{ef} = \frac{V_{1ef}}{100}$, preenchendo o Quadro 34.1.

3) Calcule a impedância para cada caso, utilizando $Z = \frac{V_{ef}}{I_{ef}}$, preenchendo o Quadro 34.1.

4) Calcule para a frequência de 600Hz e amplitude $5V_{pp}$ as correntes no resistor e no capacitor, para o circuito da Figura 34.5. Compare a corrente total do circuito calculada com a medida, explicando as eventuais discrepâncias.

5) Esboce o diagrama vetorial do circuito da Figura 34.6.

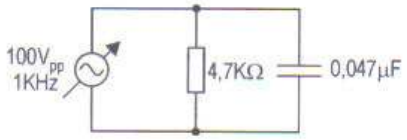


Figura 34.6

EXPERIÊNCIA

35

Circuito RL-Paralelo

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o comportamento de um circuito RL-Paralelo.

Teoria

O circuito RL-Paralelo é composto por um resistor em paralelo com um indutor, conforme mostra a Figura 35.1.

Na construção do diagrama vetorial visto na Figura 35.2 consideramos como referência a tensão, pois sendo um circuito paralelo, ela é a mesma em todos os componentes e no indutor está adiantada de $\frac{\pi}{2}$ radianos em relação à corrente.

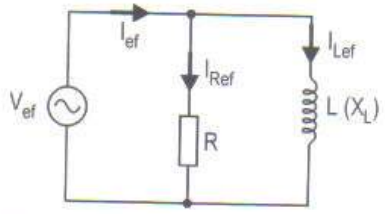


Figura 35.1 - Circuito RL-Paralelo.

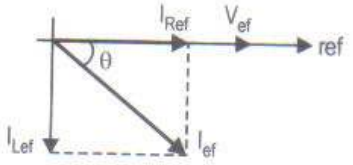


Figura 35.2 - Diagrama vetorial de um circuito RL-Paralelo.

Do diagrama temos que a soma vetorial das correntes do resistor e do indutor é igual à corrente total do circuito. Assim sendo, podemos escrever:

$$I_{ef}^2 = I_{Ref}^2 + I_{Lef}^2$$

dividindo todos os termos por V_{ef}^2, temos:

$$\left(\frac{I_{ef}}{V_{ef}}\right)^2 = \left(\frac{I_{Ref}}{V_{ef}}\right)^2 + \left(\frac{I_{Lef}}{V_{ef}}\right)^2$$

em que: $\frac{I_{ef}}{V_{ef}} = \frac{1}{Z}$, $\frac{I_{Ref}}{V_{ef}} = \frac{1}{R}$ e $\frac{I_{Lef}}{V_{ef}} = \frac{1}{X_L}$

portanto, podemos escrever $\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L{}^2}$ ou $Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{X_L{}^2}}}$ que é o valor da impedância do circuito.

O ângulo θ é a defasagem entre a tensão e a corrente no circuito, e pode ser determinado por meio das relações trigonométricas do triângulo retângulo:

$$\text{sen } \theta = \frac{I_{Lef}}{I_{ef}} = \frac{\frac{1}{X_L}}{\frac{1}{Z}} = \frac{Z}{X_L}$$

$$\cos \theta = \frac{I_{Ref}}{I_{ef}} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{Z}} = \frac{Z}{R}$$

$$\text{tg } \theta = \frac{I_{Lef}}{I_{Ref}} = \frac{\frac{1}{X_L}}{\frac{1}{R}} = \frac{R}{X_L}$$

Para exemplificar, vamos esboçar o diagrama vetorial do circuito da Figura 35.3.

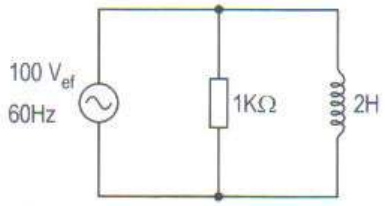


Figura 35.3 - Circuito RL-Paralelo.

1) Cálculo da reatância indutiva:

$X_L = 2\pi \cdot fL = 2\pi \cdot 60 \cdot 2 = 754\Omega$

2) Cálculo da impedância:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{X_L^2}}}$$

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{(1000)^2} + \frac{1}{(754)^2}}} = 602\Omega$$

3) Cálculo da corrente eficaz:

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{100}{602} = 166\,mA$$

4) Cálculo da corrente eficaz no resistor:

$$I_{Ref} = \frac{V_{ef}}{R} = \frac{100}{10^3} = 100mA$$

5) Cálculo da corrente eficaz no indutor:

$$I_{Lef} = \frac{V_{ef}}{X_L} = \frac{100}{754} = 132{,}6\,mA$$

6) Cálculo do ângulo de defasagem:

$$\theta = \text{arc sen}\ \frac{Z}{X_L}$$

$$\theta = \text{arc sen}\ \frac{602}{754}$$

$$\theta = 52{,}9°$$

7) Diagrama vetorial:

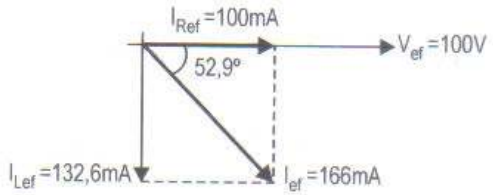


Figura 35.4

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Resistor: 100Ω e 4,7KΩ.
- Indutor: 10mH.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 35.5. Ajuste o gerador de sinais para $5V_{pp}$, onda senoidal.

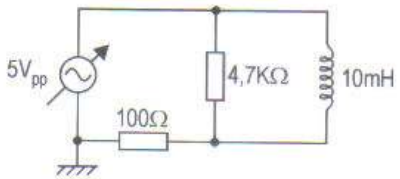


Figura 35.5

2) Varie a frequência sob gerador de sinais, conforme o Quadro 35.1. Para cada valor ajustado meça e anote a tensão pico a pico no resistor de 100Ω (V_1).

f(KHz)	V_{1pp}	V_{1ef}	I_{ef}	Z
50				
60				
70				
80				
90				
100				

Quadro 35.1

Exercícios

1) Calcule o valor eficaz das tensões no resistor de 100Ω, preenchendo o Quadro 35.1.

2) Calcule o valor eficaz das correntes no circuito, utilizando $I_{ef} = \frac{V_{1ef}}{100}$, preenchendo o Quadro 35.1.

3) Calcule a impedância para cada caso, utilizando $Z = \frac{V_{ef}}{I_{ef}}$, preenchendo o Quadro 35.1.

4) Calcule para a frequência de 70Hz e amplitude $5V_{pp}$ as correntes no resistor e no indutor, para o circuito da Figura 35.5. Compare a corrente total do circuito calculada com a medida, explicando as eventuais discrepâncias.

5) Esboce o diagrama vetorial do circuito da Figura 35.6.

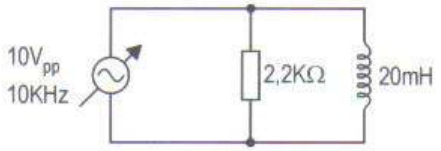


Figura 35.6

EXPERIÊNCIA

36

Circuito RLC-Paralelo

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o comportamento de um circuito RLC-Paralelo.

Teoria

O circuito RLC-Paralelo é composto por um resistor, um capacitor e um indutor, associados em paralelo, conforme mostra a Figura 36.1.

Na construção do diagrama vetorial visto na Figura 36.2, consideramos como referência a tensão, e neste caso ela está adiantada de $\frac{\pi}{2}$ rad em relação à corrente do indutor e atrasada de $\frac{\pi}{2}$ rad em relação à corrente do capacitor.

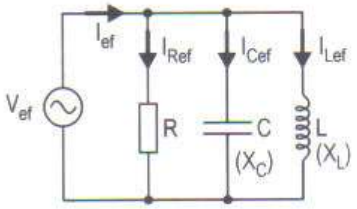


Figura 36.1 - Circuito RLC-Paralelo.

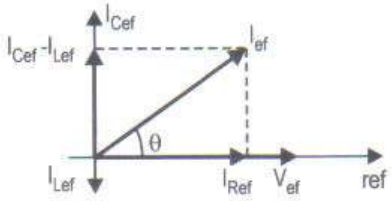


Figura 36.2 - Diagrama vetorial de um circuito RLC-Paralelo.

Para fins de diagrama vetorial, utiliza-se a resultante, pois os vetores que representam a corrente no capacitor e a corrente no indutor têm a mesma direção e sentidos opostos.

Observando o diagrama, notamos que I_{Cef} é maior que I_{Lef}, portanto temos como resultante um vetor $(I_{Cef} - I_{Lef})$.

No caso de termos I_{Lef} maior que I_{Cef}, obteremos um vetor com resultante $(I_{Lef} - I_{Cef})$ com sentido oposto ao anteriormente descrito.

Do diagrama temos que a soma vetorial da corrente resultante com a do resistor é igual à corrente total do circuito. Assim sendo, podemos escrever:

$$I_{ef}^2 = I_{Ref}^2 + (I_{Cef} - I_{Lef})^2$$

dividindo todos os termos por V_{ef}^2, temos: $\left(\frac{I_{ef}}{V_{ef}}\right)^2 = \left(\frac{I_{Ref}}{V_{ef}}\right)^2 + \left(\frac{I_{Cef}}{V_{ef}} - \frac{I_{Lef}}{V_{ef}}\right)^2$

em que: $\frac{I_{ef}}{V_{ef}} = \frac{1}{Z}$, $\frac{I_{Ref}}{V_{ef}} = \frac{1}{R}$, $\frac{I_{Cef}}{V_{ef}} = \frac{1}{X_c}$ e $\frac{I_{Lef}}{V_{ef}} = \frac{1}{X_L}$

portanto, podemos escrever: $\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right)^2$

ou $Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R_2} + \left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right)^2}}$ que é o valor da impedância do circuito.

O ângulo θ é a defasagem entre a tensão e a corrente no circuito e pode ser determinado por meio das relações trigonométricas do triângulo retângulo:

$$\text{sen } \theta = \frac{I_{Cef}}{I_{ef}} = \frac{\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}}{\frac{1}{Z}} = Z\left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right)$$

$$\cos \theta = \frac{I_{Ref}}{I_{ef}} = \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{Z}} = \frac{Z}{R}$$

$$\text{tg } \theta = \frac{I_{Cef} - I_{Lef}}{I_{Ref}} = \frac{\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}}{\frac{1}{R}} = R\left(\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_L}\right)$$

Da mesma forma que o circuito RLC-Série, o RLC-Paralelo estará em ressonância quando tivermos valores iguais para as reatâncias indutiva e capacitativa. Tal fato acontece na frequência de ressonância (f_o) determinada por:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Para o circuito RLC-Paralelo em ressonância temos a máxima impedância (Z = R), sendo a curva da impedância em função da frequência vista na Figura 36.3.

Podemos também levantar a curva da corrente em função da frequência para o mesmo circuito. Essa curva é vista na Figura 36.4.

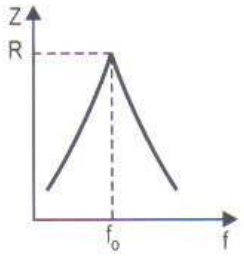


Figura 36.3 - Característica da impedância de um circuito RLC-Paralelo.

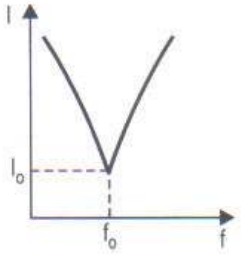


Figura 36.4 - Característica da corrente de um circuito RLC-Paralelo.

Observando o gráfico, vemos que para a frequência de ressonância a corrente é mínima (I_o), pois a impedância é máxima (Z = R).

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Resistor: 10Ω e 2,2KΩ.
- Indutor: 10mH.
- Capacitor: 0,01μF.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 36.5. Ajuste o gerador de sinais para $5V_{pp}$, onda senoidal.

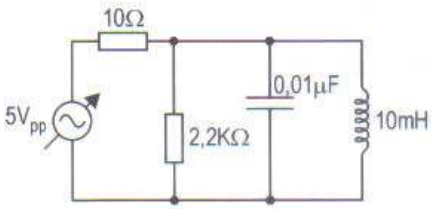


Figura 36.5

2) Varie a frequência do gerador de sinais, conforme o Quadro 36.1. Para cada valor ajustado meça e anote a tensão pico a pico no resistor de 100Ω (V_1).

f(KHz)	V_{1pp}	V_{1ef}	I_{ef}	Z
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Quadro 36.1

Exercícios

1) Calcule o valor eficaz das tensões do resistor de 10Ω, preenchendo o Quadro 36.1.

2) Calcule o valor eficaz das correntes no circuito, utilizando $I_{ef} = \frac{V_{1ef}}{10}$, preenchendo o Quadro 36.1.

3) Calcule a impedância para cada caso, utilizando $Z = \frac{V_{ef}}{I_{ef}}$, preenchendo o Quadro 36.1.

4) Construa os gráficos $Z = f(f)$ e $I_{ef} = f(f)$.

5) Determine a frequência de ressonância no gráfico Z = f (f).

6) Calcule a impedância na frequência de ressonância do circuito da Figura 36.6, quando a chave S estiver aberta e quando estiver fechada. Discuta os resultados.

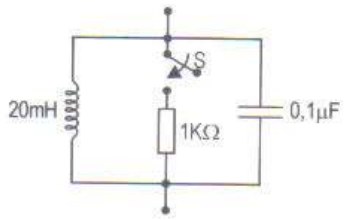


Figura 36.6

EXPERIÊNCIA

37

Filtros Passa-Baixa e Passa-Alta

Objetivo

- Verificar o funcionamento de um circuito RC atuando como filtro passa-baixa e como filtro passa-alta.

Teoria

Dentro dos filtros passivos encontramos os **filtros passa-baixa** e **passa-alta**. O filtro passa-baixa é constituído por um circuito RC-Série em que a tensão de saída é a do capacitor. Esse circuito é visto na Figura 37.1.

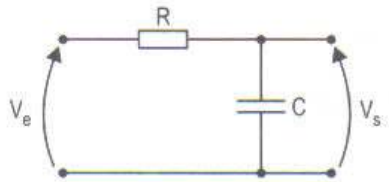


Figura 37.1 - Filtro passa-baixa.

Para ondas senoidais de frequências baixas, a reatância capacitiva assume valores altos em comparação com o valor da resistência. Dessa maneira, a tensão de saída é praticamente igual à tensão de entrada. Para frequências altas, a reatância capacitiva assume valores baixos em comparação com o valor da resistência, atenuando a tensão de saída para um valor praticamente nulo. Dessa maneira, o filtro permite a passagem de sinais de frequências baixas, sendo por isso denominado filtro passa-baixa.

Para uma determinada frequência, quando a reatância capacitiva for igual à resistência, teremos a tensão de saída igual à tensão no resistor, que somadas vetorialmente resultam na tensão de entrada. Dessa maneira, podemos escrever:

$$V_e = \sqrt{V_R^2 + V_c^2}$$

sendo: $V_R = V_c = V_s \quad \therefore \quad V_e = \sqrt{V_s^2 + V_s^2}$

$$V_e = \sqrt{2V_s^2}$$

$$V_e = V_s\sqrt{2} \quad \text{ou} \quad V_s = \frac{V_e}{\sqrt{2}}$$

Essa frequência, em que temos a situação anterior descrita, é denominada frequência de corte (f_c) e pode ser determinada igualando o valor da reatância com o valor da resistência.

$$X_c = R \quad \text{ou} \quad \frac{1}{2\pi f_c C} = R \quad \therefore \quad f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

A característica da tensão de saída em função da frequência de um filtro passa-baixa é vista na Figura 37.2.

Com o diagrama vetorial construído do circuito da Figura 37.1 podemos determinar a defasagem entre a tensão de saída e a tensão de entrada, utilizando a reação trigonométrica $\cos\theta = \frac{V_s}{V_e}$. Esse diagrama encontra-se na Figura 37.3.

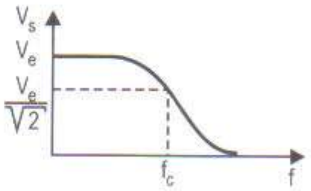


Figura 37.2 - Característica da tensão de saída de um filtro passa-baixa.

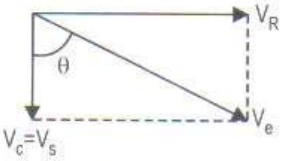


Figura 37.3 - Diagrama vetorial de um filtro passa-baixa.

Como em baixas frequências $V_s = V_e$, temos que $\cos\theta = 1$, portanto $\theta = 0°$. Para altas frequências $V_s = 0$ e $\cos\theta = 0$, portanto $\theta = 90°$. Na frequência de corte, $V_s = \frac{V_e}{\sqrt{2}}$ e $\cos\theta = \frac{I}{\sqrt{2}}$, portanto $\theta = 45°$.

A curva da defasagem em função da frequência é indicada na Figura 37.4.

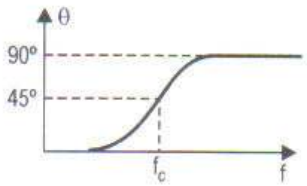


Figura 37.4 - Característica da defasagem de um filtro passa-baixa.

O filtro passa-alta é constituído pelo mesmo circuito RC-Série, somente que, neste caso, a tensão de saída é a obtida pelo resistor. A Figura 37.5 mostra esse circuito.

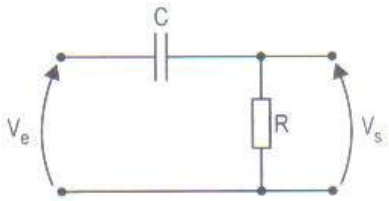


Figura 37.5 - Filtro passa-alta.

Para ondas senoidais de frequências altas, a reatância capacitiva assume valores baixos em comparação com o valor da resistência, dessa maneira a tensão de saída será praticamente igual à tensão de entrada.

Para frequências baixas, a reatância capacitiva assume valores altos em comparação com o valor de resistência, atenuando a tensão de saída para um valor praticamente nulo. Dessa maneira, o filtro permite a passagem de sinais de frequências altas, sendo por isso denominado filtro passa-alta.

Da mesma forma que no filtro passa-baixa, na frequência de corte, em que a reatância capacitiva é igual à resistência, a tensão de saída será dada por:

$$V_s = \frac{V_e}{\sqrt{2}}$$

A característica da tensão de saída, em função da frequência de um filtro passa-alta, é vista na Figura 37.6.

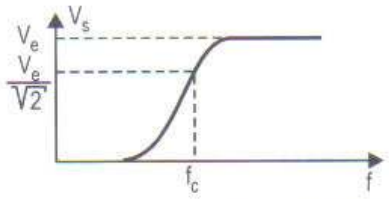


Figura 37.6 - Característica de tensão de saída de um filtro passa-alta.

Construindo o diagrama vetorial, por intermédio dele podemos determinar a defasagem entre a tensão de saída e a de entrada, utilizando a relação trigonométrica $\cos\theta = \frac{V_s}{V_e}$. Esse diagrama é visto na Figura 37.7.

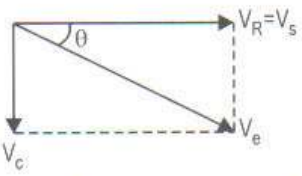


Figura 37.7 - Diagrama vetorial de um filtro passa-alta.

Em baixas frequências: $V_s = 0$, $\cos\theta = 0$ e $\theta = 90°$

Em altas frequências: $V_s = V_e$, $\cos\theta = 1$ e $\theta = 0°$

Na frequência de corte: $V_s = \frac{V_e}{\sqrt{2}}$, $\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{2}}$ e $\theta = 45°$

A curva da defasagem, em função da frequência, é exibida na Figura 37.8.

Para exemplificar, vamos calcular a tensão de saída do filtro passa-baixa da Figura 37.9, na frequência de corte, numa frequência dez vezes menor e em outra dez vezes maior.

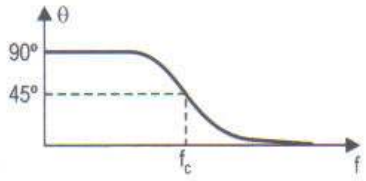


Figura 37.8 - Característica de defasagem de um filtro passa-alta.

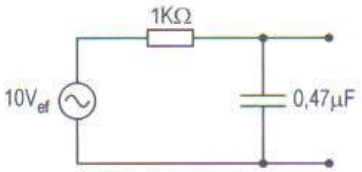


Figura 37.9 - Filtro passa-baixa.

1) Cálculo da frequência de corte:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 0{,}47 \cdot 10^{-6}} = 338{,}6\,Hz$$

2) Cálculo da tensão de saída na frequência de corte:

$$V_s = \frac{V_e}{\sqrt{2}} = \frac{10}{\sqrt{2}} = 7{,}07\ V_{ef}$$

3) Cálculo de V_s para $f = \frac{f_c}{10} = 33{,}86\ Hz$

$$X_c = \frac{1}{2\pi fc} = \frac{1}{2\pi \cdot 33{,}86 \cdot 0{,}47 \cdot 10^{-6}} = 10K\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{(10^3)^2 + (10^4)^2} = 10K\,\Omega$$

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{10}{10 \cdot 10^3} = 1mA$$

$$V_s = X_c \cdot I_{ef} = 10 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 10V$$

4) Cálculo de V_s para $f = 10 \cdot f_c = 3386Hz$

$$X_c = \frac{1}{2\pi fc} = \frac{1}{2\pi \cdot 3386 \cdot 0{,}47 \cdot 10^{-6}} = 100\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{(10^3)^2 + (100)^2} = 1K\,\Omega$$

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{Z} = \frac{10}{10^3} = 10mA$$

$$V_s = X_c \cdot I_{ef} = 100 \cdot 10 \cdot 10^{-3} = 1V$$

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Resistor: 2,2KΩ.
- Capacitor: 0,1μF.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 37.10. Ajuste o gerador de sinais para $2V_{pp}$, onda senoidal.

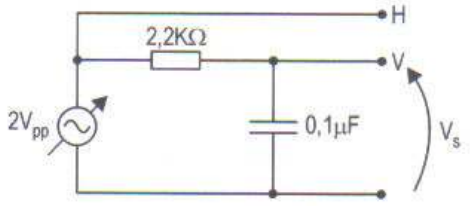


Figura 37.10

2) Varie a frequência do gerador, conforme o Quadro 37.1. Com a varredura ligada, meça e anote a tensão de saída. Com a varredura desligada, meça e anote 2a e 2b.

f(Hz)	V_{spp}	V_{sef}	2a	2b	Δθ
200					
600					
1000					
1400					
1800					
2200					
2600					
3000					

Quadro 37.1

3) Monte o circuito da Figura 37.11. Ajuste o gerador de sinais para $2V_{pp}$, onda senoidal.

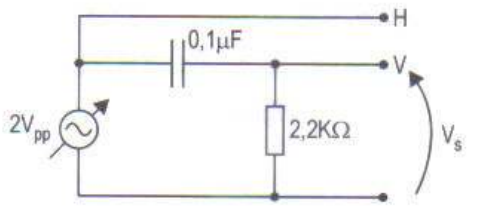


Figura 37.11

4) Repita o item 2, preenchendo o Quadro 37.2.

f(Hz)	V_{spp}	V_{sef}	2a	2b	$\Delta\theta$
200					
600					
1000					
1400					
1800					
2200					
2600					
3000					

Quadro 37.2

Exercícios

1) Calcule o valor eficaz das tensões de saída e o ângulo de defasagem, preenchendo os Quadros 37.1 e 37.2.

2) Construa os gráficos de $V_{sef} = f(f)$ e $\Delta\theta = f(f)$ com os valores obtidos nos Quadros 37.1 e 37.2.

3) Calcule a frequência de corte para os circuitos montados, indicando-a nos gráficos da questão 2.

4) Nos circuitos da parte prática, com a varredura ligada, o osciloscópio mede a tensão de saída, e com ela desligada mede o ângulo de defasagem. Por quê?

5) Calcule a tensão de saída do filtro passa-alta da Figura 37.12, na frequência de corte, numa frequência dez vezes menor e em outra dez vezes maior.

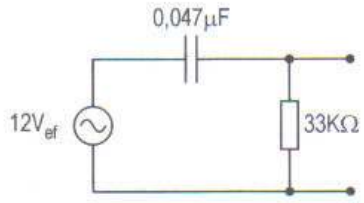


Figura 37.12

EXPERIÊNCIA

38

Transformador

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o funcionamento de um transformador.

Teoria

O transformador é constituído basicamente por dois enrolamentos que, utilizando um núcleo em comum, convertem primeiramente energia elétrica em magnética e em seguida energia magnética em elétrica.

O seu princípio de funcionamento baseia-se no fenômeno da **indução eletromagnética**, ou seja, em um enrolamento a tensão variável aplicada origina uma corrente que cria um campo magnético variável, induzindo uma corrente e, consequentemente, uma tensão no outro enrolamento próximo.

A Figura 38.1 mostra o esquema básico de um transformador.

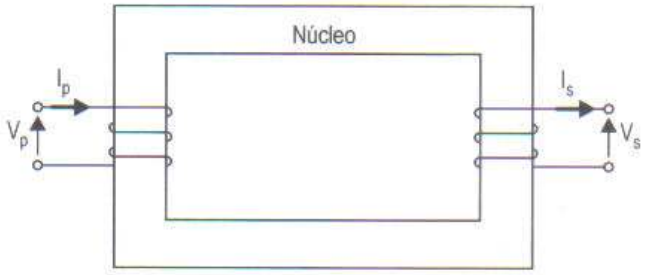


Figura 38.1 - Transformador básico.

Observando a figura, notamos que o transformador possui um **enrolamento primário** em que é aplicada a tensão a ser convertida (V_p), e um **enrolamento secundário** do qual se retira a tensão de saída (V_s).

Cada enrolamento é composto por um determinado número de espiras responsável pela relação de conversão, ou seja, a tensão de saída será proporcional à relação do número de espiras e ao valor da tensão de entrada. Assim sendo, podemos escrever a relação:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

sendo: V_p - tensão do primário

V_s - tensão do secundário

N_p - número de espiras do primário

N_s - número de espiras do secundário

Em um **transformador ideal** a potência obtida no secundário é igual à potência aplicada ao primário, não existindo perdas. Efetuando essa igualdade, temos:

$$P_p = P_s \text{ ou } V_p \cdot I_p = V_s \cdot I_s$$

$$\therefore \frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

sendo: P_p - potência do primário

P_s - potência do secundário

I_p - corrente do primário

I_s - corrente que circula no secundário quando for ligada uma carga

Igualando as equações da relação de correntes com a do número de espiras, podemos escrever:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

Em um **transformador real** a potência obtida no secundário é menor que a potência aplicada ao primário, existindo perdas. Considerando essas perdas, podemos escrever:

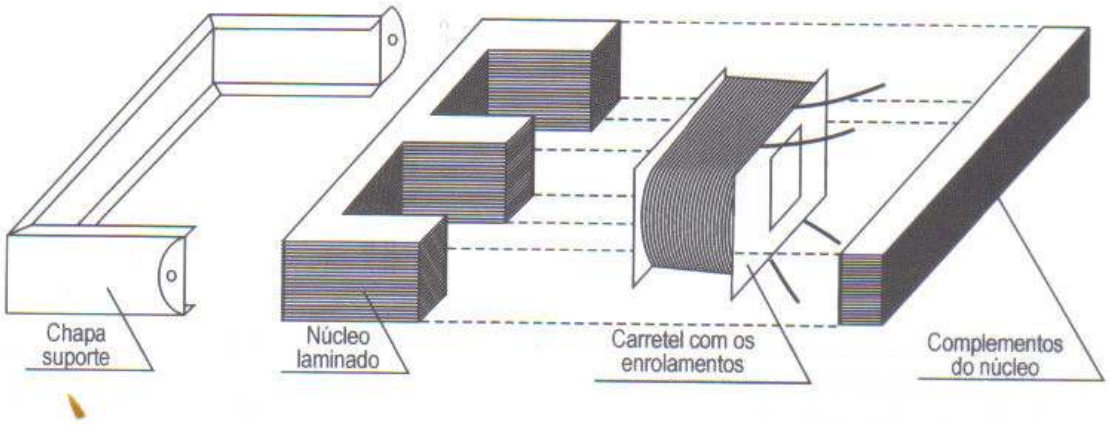
$$P_p = P_s + P_d \text{ em que } P_d = \text{potência perdida}$$

Num transformador, as principais perdas ocorrem nos enrolamentos e no núcleo. Nos enrolamentos, devido à resistência ôhmica do fio, parte da energia é convertida em calor por

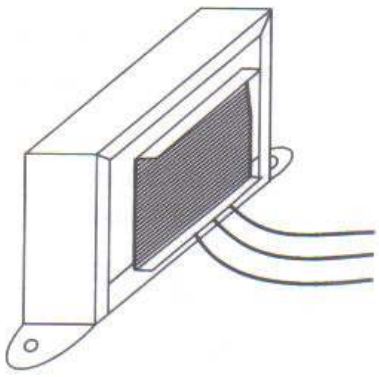
efeito Joule, causando perdas denominadas **perdas no cobre**, pois o material que constitui o fio é de cobre.

No núcleo temos perdas causadas pela **reversão magnética** cada vez que a corrente muda de sentido (ciclo de Histerese), pela **dispersão de linhas de campo magnético** e pelas **correntes parasitas de Foucault**, que induzidas no núcleo o aquecem, reduzindo o campo principal.

Para evitar as correntes de Foucault, o núcleo é constituído por chapas laminadas, isoladas por um verniz e solidamente agrupadas, enquanto para diminuir as perdas por Histerese o material é composto de aço-silício. Para reduzir a dispersão de fluxo, todo o conjunto tem um formato apropriado, em que os enrolamentos primário e secundário, por meio de um carretel, são colocados colocados na parte central, concentrando dessa maneira as linhas de campo magnético. A Figura 38.2 mostra um transformador com as características construtivas citadas.



a)



b)

Figura 38.2 - (a) Aspectos construtivos de um transformador; (b) transformador.

Como vimos, na prática as perdas podem ser minimizadas, aumentando o rendimento do transformador (η), definido pela relação entre as potências do secundário e do primário. Sendo assim, podemos escrever:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \text{ ou, em porcentagem: } \eta\% = \frac{P_s}{P_p} \cdot 100$$

Encontramos diversos tipos de transformador que, de acordo com a aplicação à qual se destinam, possuem aspectos construtivos apropriados. Como exemplo temos o transformador de alta tensão (Fly-back), cujo núcleo de ferrite e enrolamentos possuem características apropriadas para trabalhar como elevador de tensão em frequências altas.

Outra característica importante é o tipo de enrolamento, que pode ser simples, múltiplo ou com derivações. A Figura 38.3 ilustra alguns tipos de enrolamento.

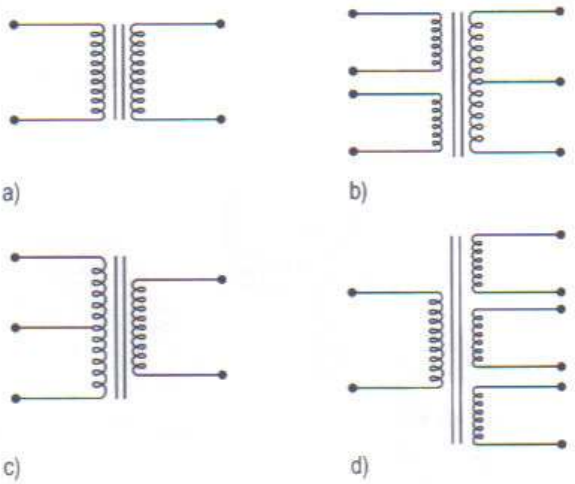


Figura 38.3 - Tipos de enrolamento - (a) primário e secundário com enrolamentos simples; (b) primário com enrolamento duplo e secundário com derivação central; (c) primário com derivação central e secundário com enrolamento simples; (d) primário com enrolamento simples e secundário com múltiplos enrolamentos.

De acordo com o sentido do enrolamento, o transformador pode defasar a tensão de saída em relação à tensão de entrada. Se o sentido do enrolamento primário coincidir com o enrolamento secundário, teremos as tensões de entrada e saída em fase; caso contrário, elas estarão defasadas de 180°.

Para facilitar a identificação, na simbologia do transformador, costuma-se colocar um ponto definindo o sentido de enrolamento. A Figura 38.4 ilustra essas situações.

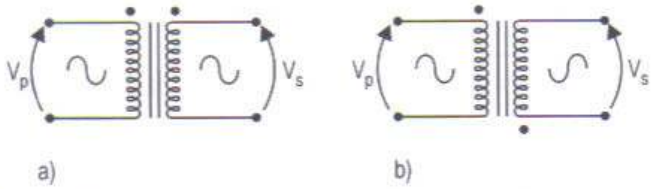


Figura 38.4 - (a) Transformador com enrolamentos de sentidos concordantes; (b) transformador com enrolamentos de sentidos opostos.

Num transformador com derivação central no secundário, como mostra a Figura 38.5, em relação ao terminal central, teremos duas tensões de mesma amplitude, porém defasadas de

180°. Em alguns casos de aplicação, como nos retificadores, essa defasagem se faz necessária para o devido funcionamento do circuito.

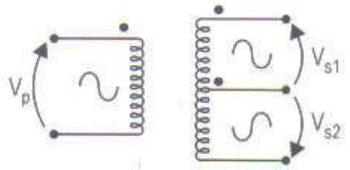


Figura 38.5 - Transformador com derivação central no secundário.

Para exemplificar, vamos calcular o número de espiras necessário nos dois enrolamentos secundários do transformador visto na Figura 38.6, para que as saídas sejam respectivamente 220V e 6V, considerando desprezíveis as perdas.

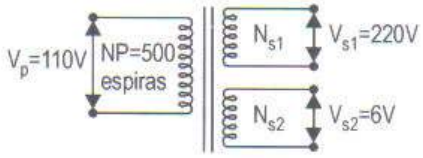


Figura 38.6

1) Cálculo de N_{S1}:

$$\frac{V_p}{V_{s1}} = \frac{N_p}{N_{s1}} \rightarrow \frac{110}{220} = \frac{500}{N_{s1}}$$

$$\therefore \quad N_{s1} = 1000 \text{ espiras}$$

2) Cálculo de N_{S2}:

$$\frac{V_p}{V_{s2}} = \frac{N_p}{N_{s2}} \rightarrow \frac{110}{6} = \frac{500}{N_{s2}}$$

$$\therefore \quad N_{s2} = 27{,}3 \text{ espiras} \qquad N_{s2\ adotado} = 28 \text{ espiras}$$

Vamos supor que seja conectada à saída de 220V uma carga que consome corrente de 0,3A e à saída de 6V uma carga de consumo igual a 0,5A. Nessa situação, vamos calcular a potência e a corrente no primário.

3) Cálculo de P_{s1}:

$$P_{s1} = V_{s1} \cdot I_{s1}$$

$$P_{s1} = 220 \cdot 0{,}3 = 66W$$

4) Cálculo de P_{s2}:

$$P_{s2} = V_{s2} \cdot I_{s2}$$

$$P_{s2} = 6 \cdot 0{,}5 = 3W$$

5) Cálculo de P_P:

$$P_P = P_{s1} + P_{s2}$$

$$P_p = 66 + 3$$

$$P_p = 69W$$

6) Cálculo de I_P:

$$I_P = \frac{P_p}{V_p}$$

$$I_P = \frac{69}{110}$$

$$I_p = 0{,}63\,A$$

Material Experimental

- Transformador: 110/12 + 12V ou 220/12 + 12V (conforme rede local).
- Multímetro.
- Osciloscópio.
- Pilha: 1,5 V (uma).

Simbologia

Parte Prática

1) Ligue o transformador à rede elétrica, conforme mostra a Figura 38.7. Meça com o voltímetro na escala AC e anote as tensões no secundário, conforme o Quadro 38.7.

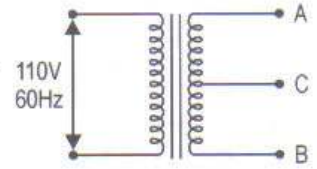


Figura 38.7

	V_{AC}	V_{BC}	V_{AB}
Formas de onda			

Quadro 38.1

2) Verifique com o osciloscópio as formas de onda nos mesmos pontos do item 1. Depois anote-as no Quadro 38.1.

3) Monte o circuito da Figura 38.8. Com o multímetro na menor escala V_{DC}, ligue e desligue a chave S. Observe e anote no Quadro 38.2 o que acontece.

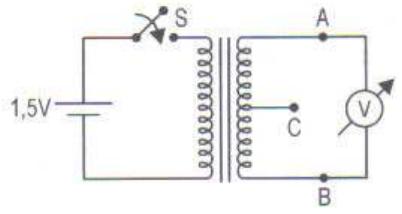


Figura 38.8

Comentários

Quadro 38.2

4) Inverta a polaridade do multímetro e repita o item 3, anotando o que acontece no Quadro 38.3.

Comentários

Quadro 38.3

Exercícios

1) Com os dados do Quadro 38.1, determine a relação de espiras do transformador que você utilizou.

2) Com o osciloscópio é possível determinar a defasagem entre as tensões do secundário? Por quê?

3) Em relação ao item 3, o que aconteceria se ligássemos a bateria e a chave S entre os pontos A e B, e o voltímetro ao primário do transformador?

4) Pode um transformador ser alimentado por uma tensão contínua constante? Por quê?

5) A Figura 38.9 mostra um transformador ideal. Sabendo que ao primário foi aplicado o sinal V_p, calcule as tensões no secundário e desenhe as respectivas formas de onda.

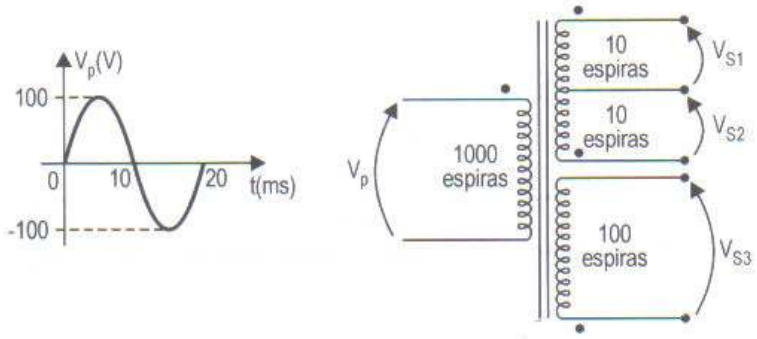


Figura 38.9

EXPERIÊNCIA

39

Diodo

Objetivo

- Levantar a curva característica de um diodo.

Teoria

No campo da eletrônica, dentre os materiais utilizados encontramos os **semicondutores** que possuem características que ficam entre os condutores e os isolantes. O material semicondutor mais utilizado é o silício (Si), que na sua forma pura (intrínseca) apresenta uma estrutura cristalina, tendo quatro elétrons na camada de valência, sendo por isso tetravalente. Sua estrutura encontra-se na Figura 39.1.

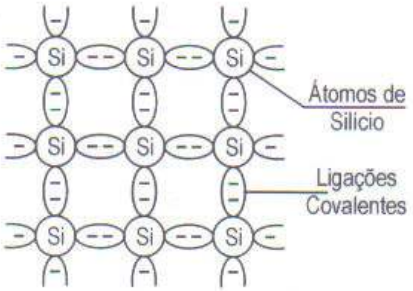


Figura 39.1 - Estrutura de um semicondutor intrínseco.

A -273°C não há elétrons livres ou fracamente ligados. O semicondutor intrínseco comporta-se como isolante perfeito. Elevando a temperatura, os átomos, recebendo energia, iniciam um processo de agitação térmica, quebrando a estabilidade, rompendo ligações covalentes, liberando elétrons e originando, na falta destes, **lacunas** ou **buracos**.

A partir do semicondutor intrínseco, podemos formar os materiais **P** ou **N**, adicionando impurezas, ou seja, outros materiais, por processo conhecido como **dopagem**. Esse semicondutor dopado passa a ser denominado material extrínseco. Para formarmos um material P,

adicionamos ao cristal de silício impurezas trivalentes, como, por exemplo, o alumínio (Al). Essa estrutura é vista na Figura 39.2.

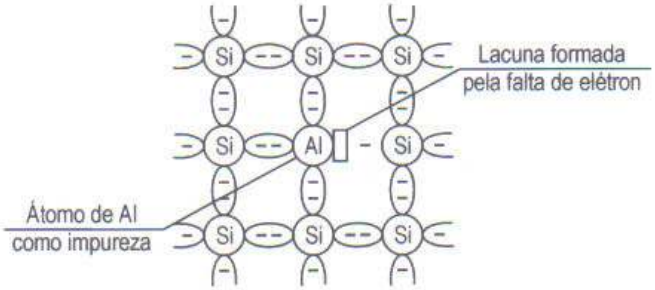


Figura 39.2 - Semicondutor extrínseco P.

Observando a figura, notamos que há três ligações completas de elétrons e uma quarta incompleta, por região do material, originando uma lacuna e um íon negativo fixo à estrutura do cristal, dando ao material características receptivas, ou seja, de atrair elétrons para completar a quarta ligação.

Nesse material as lacunas são em maioria, por isso denominam-se **portadores majoritários**. Existem também elétrons como **portadores minoritários** que aparecem pelo rompimento de ligações covalentes, provocadas pelo fornecimento da energia ao material. O material P pode ser representado como mostra a Figura 39.3.

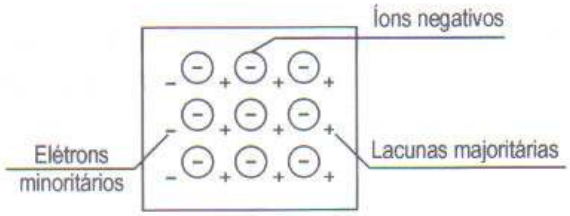


Figura 39.3 - Material extrínseco P.

Para formar um material N, adicionamos ao cristal do silício impurezas pentavalentes, como, por exemplo, o fósforo (P). Essa estrutura aparece na Figura 39.4.

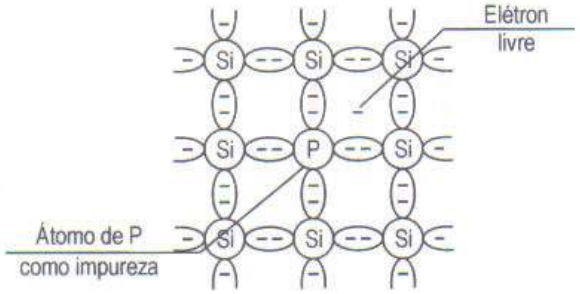


Figura 39.4 - Semicondutor extrínseco N.

Observando a figura, notamos que há quatro ligações completas, um elétron livre, por região do material, e um íon positivo fixo à estrutura do cristal, dando ao material caracte-

rísticas doadoras, ou seja, de doar o elétron livre de maneira a ficar estável. Nesse material, os elétrons são os portadores majoritários e as lacunas os minoritários. O material N pode ser representado de acordo com a Figura 39.5.

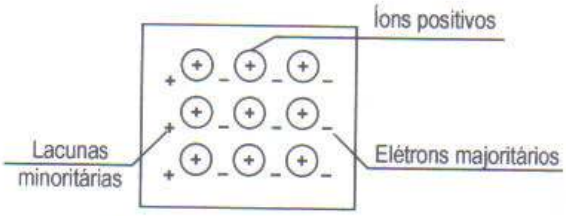


Figura 39.5 - Material extrínseco N.

Para constituir os dispositivos semicondutores, é necessário unir os materiais P e N de maneira a formar a junção PN, Figura 39.6.

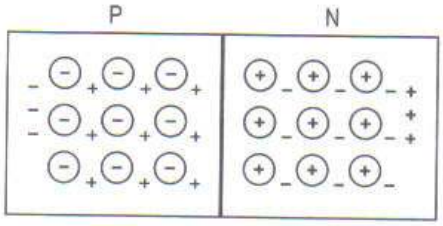


Figura 39.6 - Junção PN.

Na junção PN não polarizada, isto é, sem conexão de fonte externa, há um deslocamento de elétrons da região N para a região P e, simultaneamente, um deslocamento de lacunas da região P para a região N, originando uma corrente, denominada **corrente de difusão**. Durante esse deslocamento de portadores de cargas, elétrons e lacunas recombinam-se, anulando suas cargas, surgindo ao lado da junção uma região neutra, ou seja, de carga elétrica nula, denominada **barreira de potencial (B.P.)** ou **camada de carga espacial (C.C.E.)**.

À medida que elétrons e lacunas vão se recombinando, ocorre aumento da barreira de potencial até atingir um ponto de equilíbrio, isolando um material do outro. A Figura 39.7 mostra uma junção PN não polarizada com a barreira de potencial.

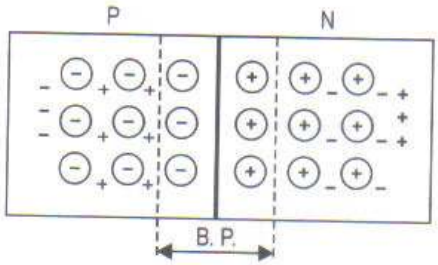


Figura 39.7 - Junção PN não polarizada com a barreira potencial.

Podemos polarizar a junção PN de duas maneiras: diretamente ou reversamente. A polarização direta consiste em ligar o polo positivo de uma fonte no lado P e o negativo no lado N, conforme a Figura 39.8.

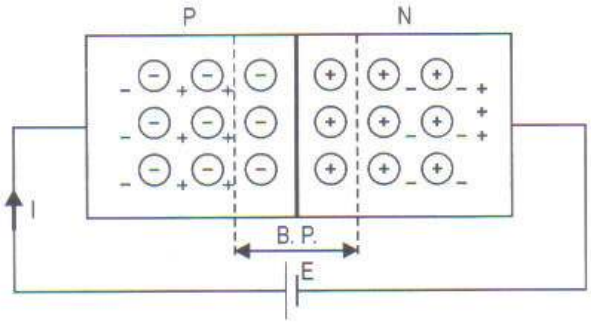


Figura 39.8 - Junção PN diretamente polarizada.

Nesse tipo de polarização, o polo positivo atrai os elétrons livres do lado N, fazendo-os vencer a barreira de potencial, originando assim uma corrente de elétrons do polo negativo para o positivo da bateria. Simultaneamente sai uma corrente de lacunas do polo positivo para o negativo da bateria, sendo esta última adotada, para fins de análise, em circuitos com dispositivos semicondutores.

O material, nesse caso, tem características condutivas, pois circulando uma corrente, apresenta uma resistência ôhmica de valor baixo, na ordem de algumas dezenas de ohms. Devido aos íons formados na barreira, entre os terminais de junção aparece uma diferença de potencial, que para o semicondutor de silício está compreendida entre 0,5 e 0,8V.

A polarização reversa consiste em ligar o polo positivo de uma fonte no lado N e o negativo no lado P, conforme apresenta a Figura 39.9.

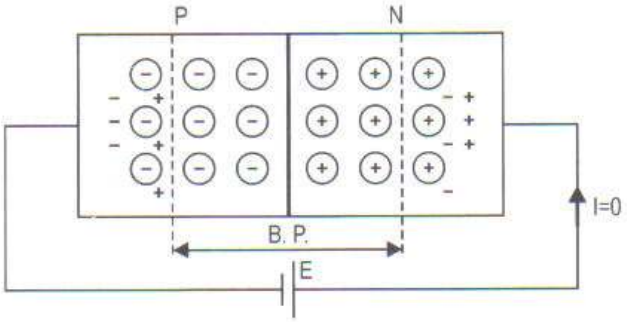


Figura 39.9 - Junção PN reversamente polarizada.

Nesse tipo de polarização, o polo positivo atrai os elétrons e o polo negativo, as lacunas, aumentando a barreira de potencial, não havendo, portanto, condução de corrente elétrica devido aos portadores majoritários, existindo apenas uma corrente devido aos portadores minoritários, denominada **corrente de fuga**, que para o semicondutor de silício é da ordem da nanoampères (nA), tornando-se desprezível. O material nesse caso apresenta características isolantes, pois devido ao aumento da barreira de potencial, não há corrente, sendo sua resistência ôhmica de alto valor.

Com o devido encapsulamento e a conexão de terminais, a junção PN se torna um componente eletrônico conhecido como **diodo semicondutor**, ou simplesmente **diodo**, cuja simbologia é vista na Figura 39.10.

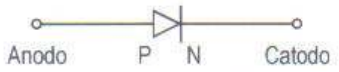


Figura 39.10 - Simbologia do diodo.

O lado P da junção PN é conhecido como anodo (A) do diodo e o lado N como catodo (K). Em polarização o diodo apresenta as mesmas características já estudadas, ou seja, quando polarizado diretamente, conduz uma corrente de ânodo para o catodo, e quando polarizado reversamente, não conduz corrente. A Figura 39.11 mostra as polarizações direta e reversa de um diodo, em que a corrente é limitada por um resistor.

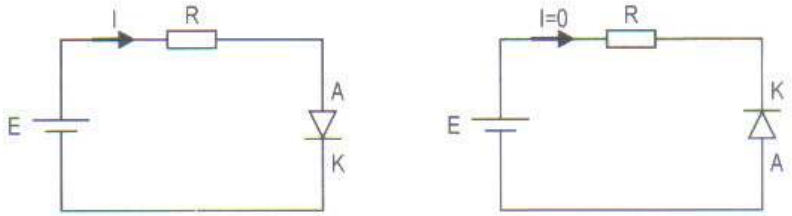


Figura 39.11 - (a) Polarização direta; (b) polarização reversa.

A curva característica de um diodo I = f(V), Figura 39.12, mostra que em polarização direta só haverá condução de corrente depois de vencida a barreira de potencial. A partir daí, a corrente aumenta de valor, enquanto a tensão permanece praticamente constante (V_D).

Em polarização reversa, a corrente é praticamente nula até atingir um determinado valor de tensão (V_{RM}). A partir desse valor inicia-se um processo de **avalanche**, aumento do número de portadores minoritários, aumentando a corrente reversa até um valor limite, permanecendo a tensão praticamente constante. Essa propriedade é denominada **efeito Zener**, e os diodos fabricados especialmente para aproveitá-la em estabilização de tensão são denominados **diodos Zener**.

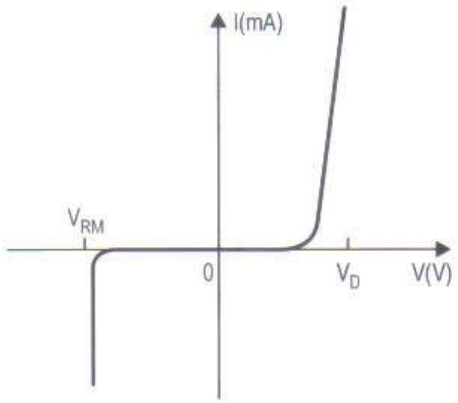


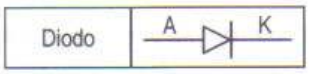
Figura 39.12 - Curva característica de um diodo.

Comercialmente, os diodos são especificados por parâmetros que indicam suas características máximas de trabalho, tais como corrente direta máxima (I_{DM}) e tensão reversa máxima (V_{RM}), que são importantes para o dimensionamento do componente em projetos. Além disso, os diodos em seus encapsulamentos apresentam uma faixa indicando o terminal catodo para a devida ligação em um circuito.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Multímetro.
- Resistor: 470Ω/5/W.
- Diodo: 1N 4001 ou equivalente.

Simbologia



Parte Prática

1) Meça com o ohmímetro e anote no Quadro 39.1 as resistências direta e reversa do diodo.

R_{Direta}	
$R_{Reversa}$	

Quadro 39.1

2) Monte o circuito da Figura 39.13.

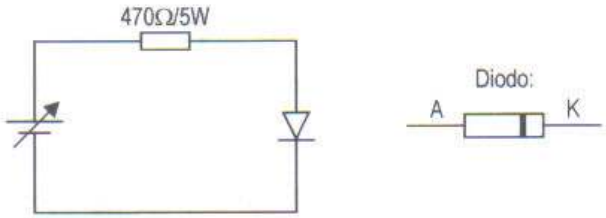


Figura 39.13

3) Ajuste a tensão da fonte de tal forma a ter no diodo os valores de tensão do Quadro 39.2. Para cada caso meça e anote a corrente no circuito.

V_D(V)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
I_D(mA)									

Quadro 39.2

4) Inverta a polaridade do diodo, conforme mostra a Figura 39.14.

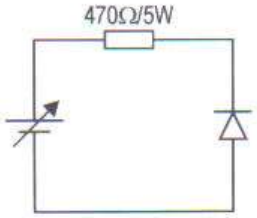


Figura 39.14

5) Repita o item 3 para os valores do Quadro 39.3.

V_D(V)	0	5	10	15	20	25	30
I_D(mA)							

Quadro 39.3

Exercícios

1) Com os dados obtidos nos Quadros 39.2 e 39.3, construa a curva característica do diodo: I = f(V).

2) Como você pode identificar os terminais de um diodo com o ohmímetro?

3) Ao medir a resistência de um diodo, obteve-se um valor baixo tanto para a resistência direta como para a reversa. O que aconteceu com o diodo?

4) Determine o ponto de trabalho do diodo para o circuito da Figura 39.15, utilizando sua característica mostrada ao lado.

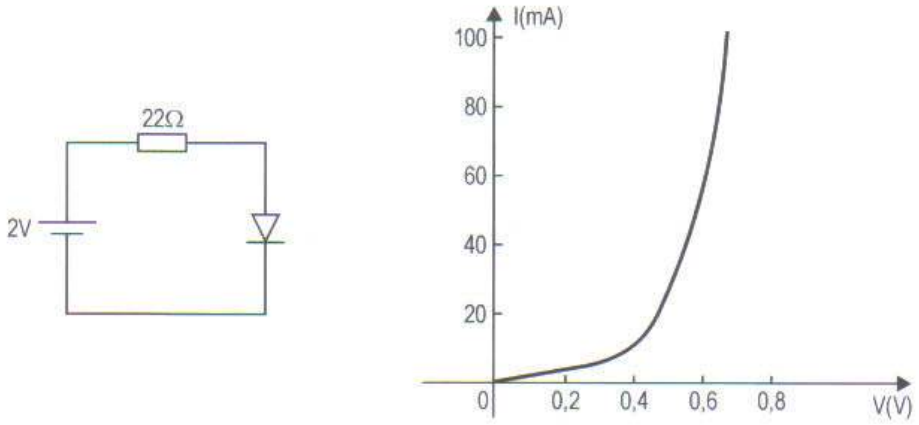


Figura 39.15

5) Supondo os diodos do circuito da Figura 39.16 ideais, determine a leitura do voltímetro para as posições das chaves A e B, conforme o Quadro 39.4.

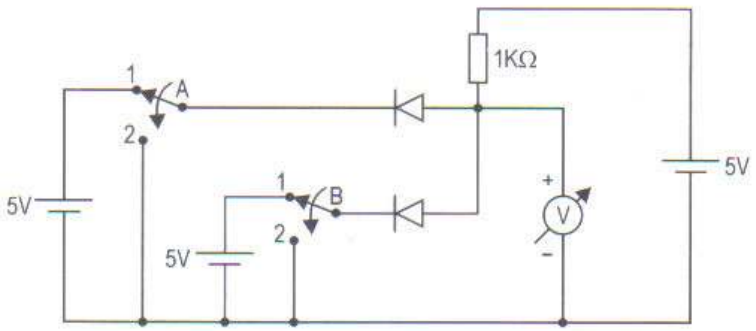


Figura 39.16

Chave A	Chave B	Voltímetro
1	1	
1	2	
2	1	
2	2	

Quadro 39.4

EXPERIÊNCIA

40

Retificação e Filtragem Capacitiva

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, os circuitos retificadores e a atuação da filtragem capacitiva.

Teoria

Os circuitos que utilizam dispositivos semicondutores necessitam ser alimentados com tensões contínuas para a devida polarização. Para poder aproveitar a rede elétrica, por se tratar de tensão alternada, necessitamos convertê-la em tensão contínua. Para tanto, utilizamos os circuitos retificadores que juntamente com os filtros possibilitam obter nas saídas tensões com característica de contínua pura. A Figura 40.1 esquematiza em blocos um circuito retificador com filtro.

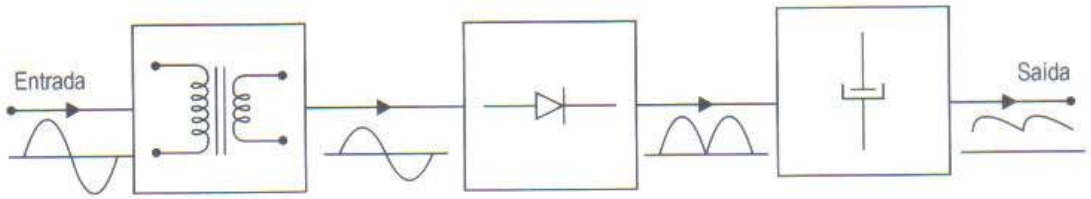


Figura 40.1 - Diagrama em blocos de um retificador com filtro.

Na figura notamos que o primeiro estágio é constituído por um transformador para normalmente reduzir a tensão de entrada. No segundo estágio, por meio de circuitos com diodos, é feita a retificação do sinal alternado. No terceiro estágio o circuito de filtro, normalmente capacitivo, transforma a tensão contínua pura.

Da maneira geral, os circuitos retificadores classificam-se em dois tipos, sendo os denominados **meia-onda** e os de **onda completa**. A Figura 40.2 apresenta o circuito retificador de meia-onda sem filtro.

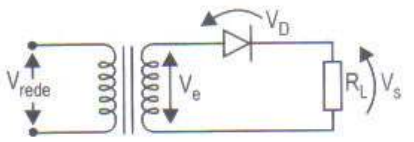


Figura 40.2 - Retificador de meia-onda.

Durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, o diodo fica diretamente polarizado e conduz, fazendo a corrente circular pela carga (R_L). Na saída aparece, neste caso, o próprio semiciclo.

No semiciclo negativo da tensão de entrada, o diodo fica reversamente polarizado, não conduzindo, fazendo com que a tensão de saída seja nula. No diodo temos a tensão (V_D), que durante a sua condução é praticamente nula e na sua não condução é igual à da entrada, ou seja, negativa.

Após este estudo podemos esboçar as formas de onda do circuito retificador de meia-onda, que são vistas na Figura 40.3.

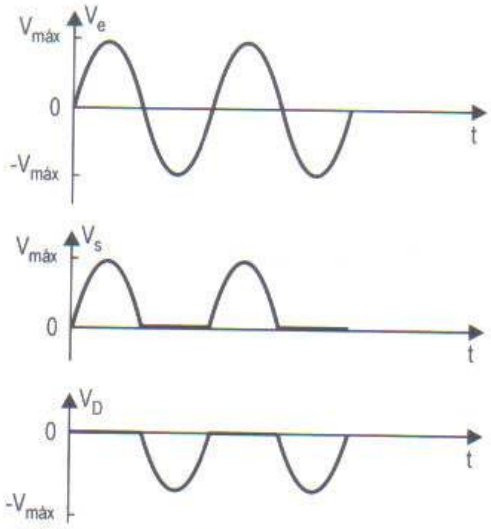


Figura 40.3 - Formas de onda do retificador de meia-onda.

A tensão contínua de saída terá um valor DC igual a:

$$V_{DC} = \frac{V_{máx}}{\pi}$$

Para poder aumentar o nível de tensão contínua na saída, colocamos um filtro capacitivo, Figura 40.4.

A atuação do capacitor consiste em carregar-se com a tensão de entrada durante o intervalo do semiciclo positivo até atingir $V_{máx}$. A partir daí, como o potencial do capacitor é maior que o da entrada, o diodo corta e o capacitor inicia um processo de descarga por meio da carga R_L até que um novo semiciclo positivo faça com que a tensão no anodo do diodo seja maior, reiniciando o processo de carga. A Figura 40.5 mostra a tensão de saída do retificador de meia-onda com a atuação do filtro.

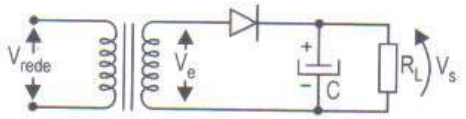


Figura 40.4 - Retificador de meia-onda com filtro capacitivo.

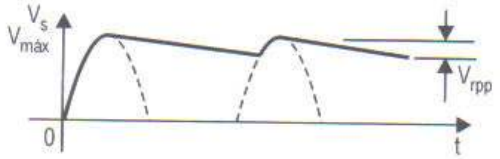


Figura 40.5 - Tensão de saída do retificador de meia-onda com filtro.

Na figura notamos que o filtro faz com que se eleve o nível DC da tensão de saída, que, dependendo do valor do capacitor e da carga RL, pode ser maior ou menor. A ondulação remanescente é denominada **tensão de ripple**, cujo valor pode avaliar a eficácia do circuito, na conversão da tensão alternada em contínua, para uma carga específica.

A retificação de onda completa pode ser obtida por meio de dois circuitos, sendo o que utiliza um transformador com derivação central e dois diodos, e o que utiliza um transformador sem derivação e quatro diodos ligados em ponte. O retificador de onda completa com dois diodos, sem filtro, aparece na Figura 40.6.

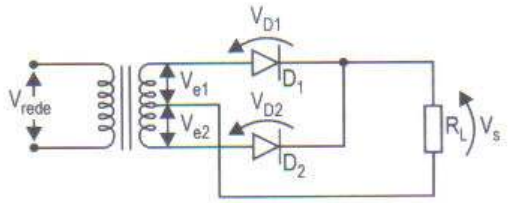


Figura 40.6 - Retificador de onda completa com dois diodos, sem filtro.

O transformador utilizado nesse circuito possui uma derivação central que defasa a tensão V_{e1} em relação a V_{e2} de 180°. Durante o semiciclo positivo de V_{e1} e o semiciclo negativo de V_{e2}, o diodo D_1 estará conduzido e o diodo D_2 cortado. Por D_1 circula uma corrente que, passando por R_L, faz com que apareça na saída o próprio semiciclo positivo de V_{e1}.

Durante o semiciclo positivo de V_{e2} e negativo de V_{e1}, o diodo D_2 fica conduzindo e o diodo D_1 cortado. Por D_2 circula uma corrente que, passando por R_L, faz com que apareça na saída o próprio semiciclo positivo de V_{e2}.

Após este estudo, podemos esboçar as formas de onda do circuito retificador de onda completa com dois diodos, sem filtro, Figura 40.7.

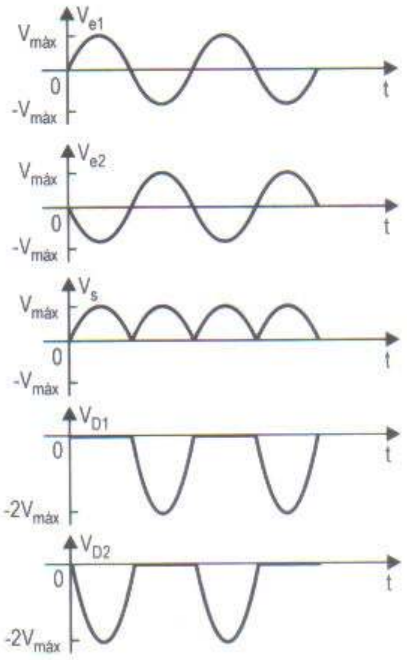


Figura 40.7 - Forma de onda do retificador de onda completa com dois diodos, sem filtros.

Os diodos D_1 e D_2 na condução apresentam uma tensão praticamente nula entre seus terminais e na não condução, uma tensão de $-2\ V_{máx.}$, pois quando um deles estiver cortado, o outro estará conduzindo, fazendo com que a tensão total do secundário do transformador seja aplicada sobre o cortado.

O retificador de onda completa com diodos em ponte, sem filtro, é visto na Figura 40.8.

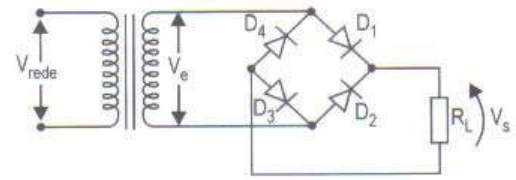


Figura 40.8 - Retificador de onda completa com diodos em ponte, sem filtro.

Nessa ligação, utilizando diodos em ponte, durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, os diodos D_1 e D_3 estarão conduzindo, fazendo circular uma corrente que, passando por R_L, faz com que apareça na saída o próprio semiciclo. No semiciclo negativo, os diodos D_2 e D_4 estarão conduzindo, fazendo circular uma corrente, por meio de R_L, com o mesmo sentido que no outro caso, surgindo na saída uma tensão igualmente positiva.

Após este estudo podemos esboçar as formas de onda do circuito retificador de onda completa com diodos em ponte, sem filtro, mostradas na Figura 40.9.

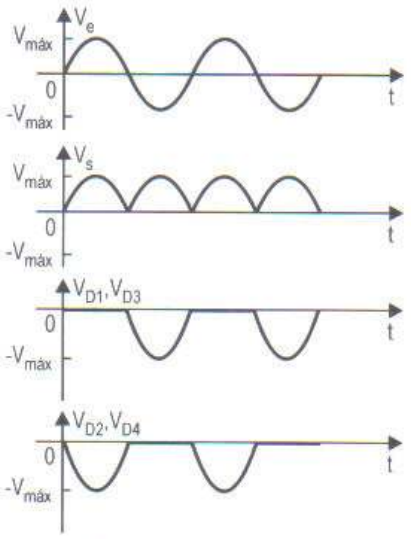


Figura 40.9 - Formas de onda do retificador de onda completa com diodo em ponte, sem filtro.

Os diodos, na sua condução, apresentam uma tensão praticamente nula entre seus terminais e na não condução, uma tensão $-V_{máx}$, pois quando estiverem cortados, estarão em paralelo com o secundário do transformador.

Nos retificadores de onda completa, como em todos os semiciclos da tensão de entrada, temos uma tensão de saída. O nível DC é o dobro em relação ao de meia-onda e dado por:

$$V_{DC} = \frac{2 \cdot V_{máx}}{\pi}$$

Para aumentar esse nível, que dependendo das circunstâncias pode tornar-se próximo a $V_{máx}$, colocamos um filtro capacitivo, como mostra a Figura 40.10.

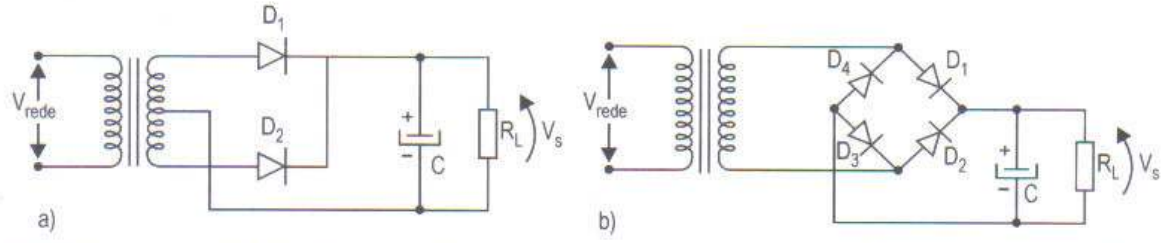


Figura 40.10 - (a) Retificador com dois diodos, com filtro, (b) Retificador com diodos em ponte, com filtro.

O capacitor de filtro carrega-se com a tensão de entrada até atingir $V_{máx}$. A partir daí, como seu potencial é maior que o da entrada, inicia um processo de descarga, por meio de R_L, até que um novo semiciclo reinicie um processo de carga. A Figura 40.11 mostra a tensão de saída dos retificadores de onda completa com a atuação do filtro.

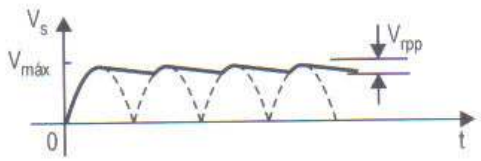


Figura 40.11 - Tensão de saída do retificador de onda completa com filtro.

Observando a figura, notamos aumento do nível DC e diminuição de tensão de ripple em relação ao retificador de meia-onda, com filtro. Isso logicamente dependendo dos valores do capacitor e da carga R_L.

Para exemplificar, vamos dimensionar um retificador de onda completa para alimentar uma carga de 12 V_{DC} e corrente máxima 1A.

1) Esquema elétrico

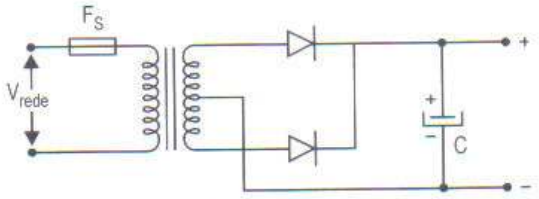


Figura 40.12

2) Escolha do transformador

Para obter $12V_{DC}$, vamos utilizar um transformador de 110V/9 + 9V/1A (ou 220V/9 + 9V/1A), pois o valor DC de saída em uma retificação de onda completa com boa filtragem é, praticamente, igual a $V_{máx}$:

$$V_{máx} = V_{ef} \cdot \sqrt{2}$$

$$V_{máx} = 9 \cdot \sqrt{2} = 12{,}7V$$

3) Escolha dos diodos:

O diodo deve suportar a corrente máxima de saída, no caso, 1A, e tensão inversa maior que $2 \cdot V_{máx}$, ou seja, 25,4V. Comercialmente, encontramos a série de diodos retificadores que atende a essa especificação.

4) Escolha do capacitor

Para uma boa filtragem necessitamos de um capacitor de alto valor. Na prática, normalmente se utiliza maior que 1000μF. Adotaremos um com valor igual a 2200μF /25V.

5) Escolha do fusível (Fs)

Utilizando a relação do transformador, temos:

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

sendo $I_s = \frac{I_{DC}}{\sqrt{2}}$, pois $I_{DC} \approx I_{máx}$, obtemos:

$$\frac{110}{9} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}}{I_p} \rightarrow I_p = 57{,}8mA$$

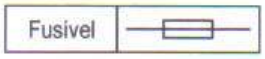
Adotaremos um fusível de 100mA.

Para obter melhor resultado, deve-se utilizar circuito retificador com estágio estabilizador na saída.

Material Experimental

- Transformador: 110V/12 + 12V/1A ou 220V/12 + 12V/1A (conforme rede local).
- Diodos: IN 4001 ou equivalente (quatro).
- Resistor: 2,2KΩ.
- Capacitor: 1000μF/25V.
- Osciloscópio.
- Multímetro.

Simbologia



Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 40.13.

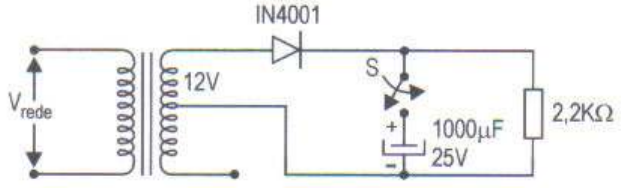


Figura 40.13

2) Com a chave S aberta (sem filtro), ligue o osciloscópio à saída, medindo $V_{máx}$ e V_{DC}. Anote os valores e as formas de onda no Quadro 40.1.

	Formas de onda	$V_{DC\ osc.}$	$V_{DC\ mult.}$
Sem filtro	$V_{máx}$:		
Com filtro	V_{rpp}:		

Quadro 40.1

3) Com o multímetro, meça e anote no Quadro 40.1 a tensão DC de saída.

4) Com a chave S fechada (com filtro), repita os itens 2 e 3, medindo, neste caso, V_{rpp} (tensão de ripple pico a pico). Anote os resultados no Quadro 40.1.

5) Monte o circuito da Figura 40.14.

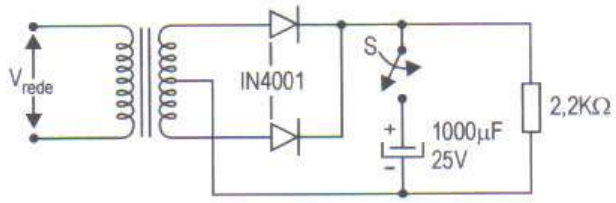


Figura 40.14

6) Com a chave S aberta, meça $V_{máx}$ e V_{DC} com o osciloscópio, anotando-os juntamente com a forma de onda no Quadro 40.2. Meça e anote também V_{DC} com o multímetro.

	Formas de onda	$V_{DC\ osc.}$	$V_{DC\ mult.}$
Sem filtro	$V_{máx}$:		
Com filtro	V_{rpp}:		

Quadro 40.2

7) Com a chave S fechada, repita o item 6, medindo V_{rpp} e preenchendo o Quadro 40.2.

8) Monte o circuito da Figura 40.15.

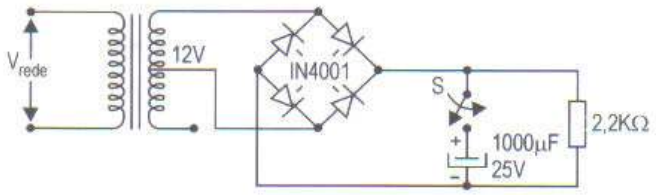


Figura 40.15

9) Repita os itens 6 e 7, preenchendo o Quadro 40.3.

	Formas de onda	$V_{DC\ osc.}$	$V_{DC\ mult.}$
Sem filtro			
	$V_{máx}$:		
Com filtro			
	V_{rpp}:		

Quadro 40.3

Exercícios

1) Calcule V_{DC} de saída para cada circuito montado, utilizando as relações vistas para os circuitos retificadores sem filtro. Compare esses valores com os medidos na experiência.

2) Compare os valores de V_{DC} medidos nos circuitos sem filtro com os respectivos obtidos com filtro.

3) Descreva o funcionamento do circuito da Figura 40.16.

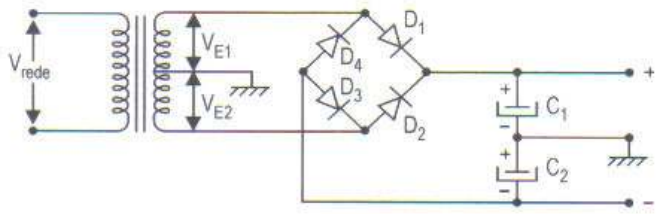


Figura 40.16

4) Dimensione um retificador de onda completa para alimentar uma carga com $9V_{DC}$ e corrente máxima de 2A.

EXPERIÊNCIA

41

Diodo Zener

Objetivo

- Levantar a curva característica de um diodo Zener.

Teoria

O diodo Zener é especialmente fabricado para trabalhar em polarização reserva, pois nestas circunstâncias apresenta uma característica de tensão constante para uma faixa de corrente. Como vimos, essa propriedade é denominada **efeito Zener** que ocorre pelo fato de o diodo trabalhar em situação de avalanche, porém neste caso controlada. A curva característica de um diodo Zener é indicada na Figura 41.1.

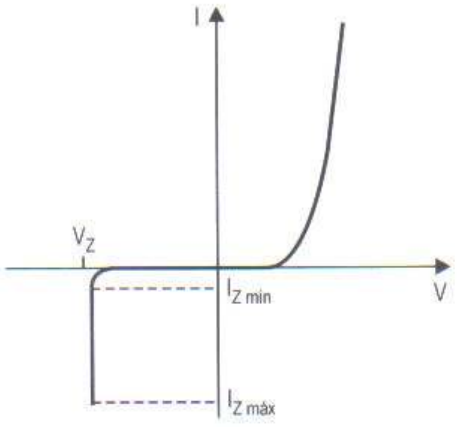


Figura 41.1 - Curva característica de um diodo Zener.

Pela curva notamos que, ao trabalhar na região reversa, com corrente maior que $I_{Z\,mín}$ até o limite $I_{Z\,máx}$, a tensão sobre o diodo V_Z permanece praticamente constante. Essa característica tem aplicação em estabilização de tensão, pois para qualquer variação da tensão de entrada, a tensão de saída permanece constante, mesmo que haja variação na carga.

O símbolo do diodo Zener e indicações do sentido de tensão e corrente de trabalho são vistos na Figura 41.2.

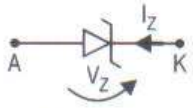


Figura 41.2 - Símbolo do diodo Zener.

Comercialmente, os diodos Zener são especificados pelo valor da tensão de Zener (V_Z) e pela potência máxima de trabalho, dada por $P_{Z\,máx} = V_Z \cdot I_{Z\,máx}$. Como podemos notar, com os parâmetros $P_{Z\,máx}$ e V_Z conseguimos determinar o valor de $I_{Z\,máx}$, porém para determinar $I_{Z\,mín}$, se faz necessária a utilização da característica dada pelo fabricante. Para fins de projetos, na prática utiliza-se:

$$I_{Z\,mín} = \frac{I_{Z\,máx}}{10}$$

que representa a aproximação do parâmetro real, extraído da característica.

Para exemplificar, vamos calcular os parâmetros para um Zener com V_Z = 6,2V e $P_{Z\,máx}$ = 400mW.

1) Cálculo de $I_{Z\,máx}$

$$I_{Z\,máx} = \frac{P_{Z\,máx}}{V_Z} = \frac{400 \cdot 10^{-3}}{6{,}2} = 64{,}5mA$$

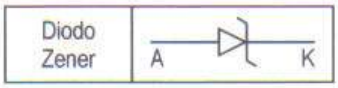
2) Cálculo de $I_{Zmín}$

$$I_{Z\,mín} = \frac{I_{Z\,máx}}{10} = \frac{64{,}5 \cdot 10^{-3}}{10} = 64{,}5mA$$

Material Experimental

- Fonte variável.
- Multímetro.
- Resistor: 470Ω/5W.
- Diodo Zener: 5,6V/1W.

Simbologia



Parte Prática

1) Meça com o ohmímetro e anote no Quadro 41.1 as resistências direta e reversa do diodo Zener.

R_{Direta}	
$R_{Reversa}$	

Quadro 41.1

2) Monte o circuito da Figura 41.3.

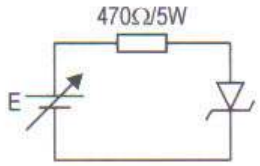


Figura 41.3

3) Ajuste a tensão da fonte de tal forma a ter no diodo os valores de tensão do Quadro 41.2. Para cada caso, meça e anote a corrente no circuito.

V_D(V)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
I_D(mA)									

Quadro 41.2

4) Inverta a polaridade do diodo, conforme mostra a Figura 41.4.

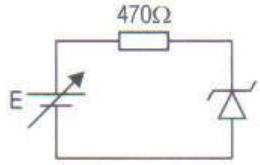


Figura 41.4

5) Ajuste a tensão da fonte de tal forma a ter no diodo os valores de corrente do Quadro 41.3. Para cada caso, meça e anote o valor da tensão no diodo.

I_D(mA)	0	5	10	15	20	25	30	35	40
V_D(V)									

Quadro 41.3

Exercícios

1) Com os dados obtidos nos Quadros 41.2 e 41.3, construa a curva característica do diodo Zener I = f(V).

2) Para o diodo Zener usado na experiência, calcule $I_{Z\,máx}$ e $I_{Z\,mín}$.

3) Um diodo retificador pode ser usado como diodo Zener? Por quê?

4) Um diodo Zener pode ser usado como diodo retificador? Por quê?

EXPERIÊNCIA

42

Estabilização

Objetivo

- Comprovar, experimentalmente, os parâmetros de uma fonte de tensão estabilizada.

Teoria

Toda fonte de tensão apresenta variações da tensão de saída em função do consumo de corrente imposto pela carga e das mudanças de tensão de entrada. Para solucionar este problema, utiliza-se a **fonte de tensão estabilizada** que dentro de uma faixa de corrente possui características típicas de um gerador ideal, ou seja, mantém a tensão de saída constante. Além disso, se a tensão de entrada variar dentro de limites estabelecidos no projeto, a tensão de saída da mesma forma não se altera.

Podemos obter uma fonte estabilizada a partir de um circuito retificador, utilizando na saída um estágio regulador de tensão com diodo Zener. Esse circuito é visto na Figura 42.1.

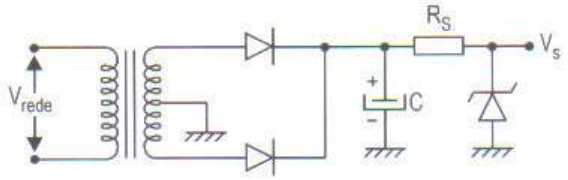


Figura 42.1 - Fonte estabilizada.

Para facilitar o desenvolvimento, vamos considerar o estágio de entrada composto pelo retificador como uma tensão V_E, e ligá-lo a uma carga R_L, conforme mostra a Figura 42.2.

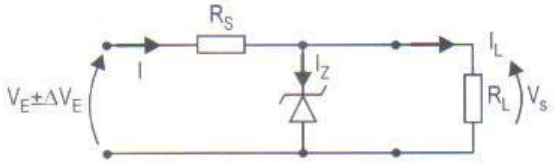


Figura 42.2 - Circuito estabilizador com carga.

Observando o circuito, notamos que, havendo variações da tensão de entrada, a tensão de saída não se altera, pois $V_s = V_Z$. Como $I = I_Z + I_L$ e I_L é constante para uma carga específica R_L, as variações da corrente I são compensadas pela corrente de Zener, obviamente, dentro da faixa compreendida entre $I_{Z\,mín}$ e $I_{Z\,máx}$. As alterações provocadas pela variação do valor da carga R_L são igualmente compensadas pela corrente de Zener, limitada pela mesma faixa.

O resistor R_s serve para limitar a corrente no diodo Zener. A pior situação possível é quando a carga for infinita, ou seja, a fonte em aberto ($I_L = 0$) e a tensão de entrada com máxima variação ($V_{E\,máx} = V_E + \Delta V_E$). Nessa situação, vamos dimensionar R_s.

$$R_{s\,mín} = \frac{V_{E\,máx} - V_Z}{I_{Z\,máx}}$$

Essa relação dá o valor mínimo de R_s. Para fins de projeto, devemos adotar um valor comercial maior que $R_{s\,mín}$, porém o mais próximo possível, para maior rendimento, em nível de corrente de saída da fonte. O limite superior para esse valor é dado considerando a tensão de entrada mínima ($V_{E\,mín} = V_E - \Delta V_E$) e a corrente mínima de operação para o diodo Zener ($I_{Z\,mín}$). Portanto, temos:

$$R_{s\,máx} = \frac{V_{E\,mín} - V_Z}{I_{Z\,mín}}$$

Após o dimensionamento e escolha de R_s, vamos estabelecer uma relação que forneça a máxima corrente de saída ($I_{L\,máx}$). Nessa situação, a corrente mínima que pode circular pelo diodo Zener é $I_{Z\,mín}$. Para fins de segurança, vamos considerar a mínima tensão de entrada ($V_{E\,mín}$). Portanto, temos:

$$I_{L\,máx} = I - I_{Z\,mín}$$

em que:

$$I = \frac{V_{E\,mín} - V_Z}{R_s}$$

substituindo, temos:

$$I_{L\,máx} = \frac{V_{E\,mín} - V_Z}{R_s} - I_{Z\,mín}$$

Considerando uma carga específica (R_L), vamos determinar as relações para obter a máxima variação da tensão de entrada possível. Nessa situação, temos:

$$I_L = \frac{V_s}{R_L}$$

e escrevendo a equação da tensão de entrada, temos:

$$V_E = R_s \cdot I + V_Z$$

em que:

$$I = I_Z + I_L$$

portanto:

$$V_{E\,mín} = R_s \cdot (I_{Z\,mín} + I_L) + V_Z$$

$$V_{E\,máx} = R_s \cdot (I_{Z\,máx} + I_L) + V_Z$$

Para exemplificar vamos dimensionar R_s para formar um circuito estabilizador alimentado com 10V ± 10%, utilizando um diodo Zener de 6,2V - 1W.

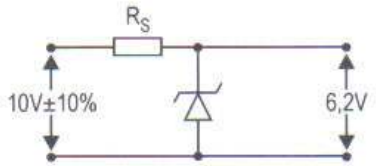


Figura 42.3 - Esquema do circuito estabilizador.

1) Cálculo de $I_{Z\,máx}$ e $I_{Z\,mín}$

$$I_{Z\,máx} = \frac{P_{Z\,máx}}{V_Z} = \frac{1}{6,2} = 161,3mA$$

$$I_{Z\,mín} = 0,1 \cdot I_{Z\,máx} = 16,13mA$$

2) Dimensionamento de R_s

$$R_{s\,mín} = \frac{V_{E\,máx} - V_Z}{I_{Z\,máx}} = \frac{11 - 6,2}{161,3 \cdot 10^{-3}}$$

$$R_{s\,mín} = 29,76\Omega$$

$$R_{s\,máx} = \frac{V_{E\,mín} - V_Z}{I_{Z\,mín}} = \frac{9 - 6,2}{16,13 \cdot 10^{-3}} = 173,6\Omega$$

$$R_{s\,adotado} = 33\Omega$$

$$P_{R_S} = R_s \cdot I^2_{Z\,máx}\ 33 \cdot (161{,}3)^2 = 858{,}6mW$$

$$R_{s\,adotado} = 33\Omega / 1{,}15W \text{ (valores comerciais)}$$

Obtido o valor de R_s, vamos calcular a máxima corrente de saída e a máxima variação possível de entrada, ligando uma carga de 180Ω.

3) Cálculo de $I_{L\,máx}$

$$I_{L\,máx} = \frac{V_{E\,mín} - V_Z}{R_s} - I_{Z\,mín}$$

$$I_{L\,máx} = \frac{9 - 6{,}2}{33} - 16{,}13 \cdot 10^{-3} = 68{,}7mA$$

4) Cálculo da variação de tensão de entrada

$$I_L = \frac{V_s}{R_L} = \frac{6{,}2}{180} = 34{,}44mA$$

$$V_{E\,mín} = R_s \cdot (I_{Z\,mín} + I_L) + V_Z$$

$$V_{E\,mín} = 33 \cdot (16{,}13 \cdot 10^{-3} + 34{,}44 \cdot 10^{-3}) + 6{,}2 = 7{,}87V$$

$$V_{E\,máx} = R_s \cdot (I_{Z\,máx} + I_L) + V_Z$$

$$V_{E\,máx} = 33 \cdot (161{,}3 \cdot 10^{-3} + 34{,}44 \cdot 10^{-3}) + 6{,}2 = 12{,}66V$$

Material Experimental

- Transformador: 110V/12 + 12V/1A ou 220V/12 + 12V/1A (conforme rede local).
- Diodos: 1N4001 (dois) ou equivalentes.
- Capacitor: 1000μF/35V.
- Diodo Zener: 12V/1W.
- Fonte variável.
- Multímetro.
- Resistor: 82Ω/1,15W, 1KΩ, 3,3KΩ, 4,7KΩ, 8,2KΩ e 10KΩ/0,5W.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 42.4.

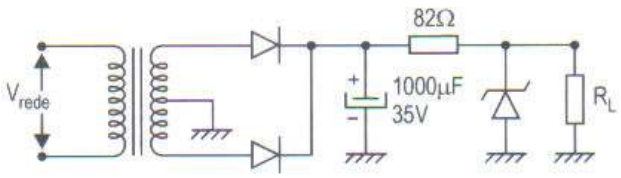


Figura 42.4

2) Conecte à saída do circuito estabilizador valores de R_L conforme o Quadro 42.1. Para cada valor meça e anote a tensão (V_s) e a corrente (I_L) na carga.

R_L(KΩ)	V_s(V)	I_L(mA)
1		
3,3		
4,7		
8,2		
10		

Quadro 42.1

3) Monte o circuito da Figura 42.5.

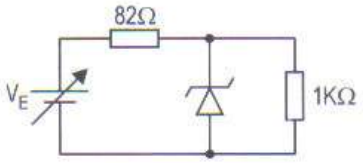


Figura 42.5

4) Varie a tensão V_E, conforme o Quadro 42.2. Para cada valor meça e anote a tensão de saída.

V_E(V)	V_s(V)
0	
2	
4	
6	
8	

V_E(V)	V_s(V)
10	
12	
14	
16	

Quadro 42.2

Exercícios

1) Construa o gráfico $V_s = f(I_L)$ com os dados do Quadro 42.1.

2) Construa o gráfico $V_s = f(V_E)$ com os dados do Quadro 42.2.

3) Determine o valor de $R_{L\ mín}$ para o circuito da Figura 42.4, supondo que a variação da tensão de entrada seja ±10%.

4) Para o circuito da Figura 42.5, calcule $V_{E\ mín}$ e $V_{E\ máx}$.

5) Compare o valor de $V_{E\ mín}$, obtido na questão anterior, com o valor determinado pelo gráfico.

6) Dimensione um circuito estabilizador, alimentado com 12V ± 10%, utilizando um diodo Zener de 8,2V – 2,5W. Calcule $I_{L\ máx}$ e quando ligada ao circuito uma carga igual a 220Ω, calcule $V_{E\ mín}$ e $V_{E\ máx}$.

EXPERIÊNCIA

43

Circuitos Ceifadores

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, as formas de onda na saída dos circuitos ceifadores, bem como as suas curvas de transferência.

Teoria

Circuitos ceifadores são aqueles que ceifam parte do sinal aplicado em suas entradas. Os principais circuitos ceifadores utilizam diodos, resistores e baterias. Para fins de análise, devemos utilizar a **curva de transferência** de cada circuito, que consiste num gráfico que relaciona tensão de saída com tensão de entrada.

A Figura 43.1 apresenta um circuito ceifador, sua característica de transferência e os sinais de entrada e de saída.

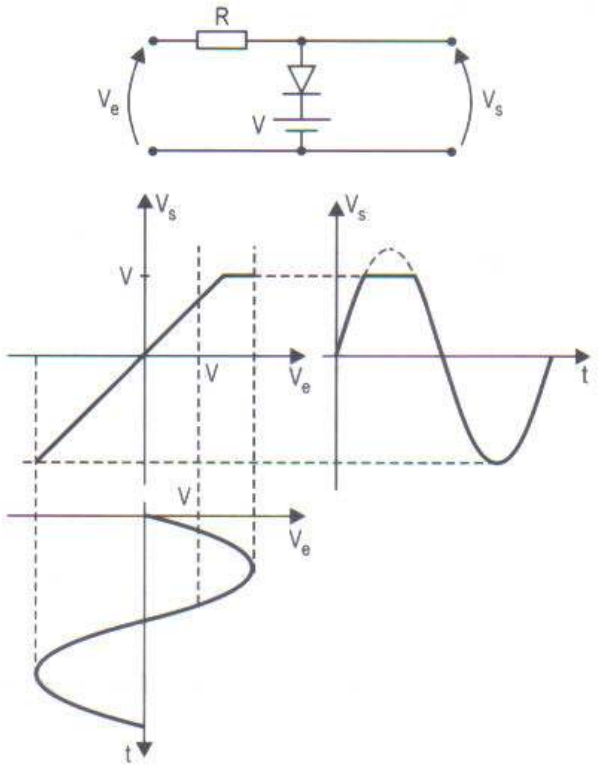


Figura 43.1 - Circuito ceifador positivo e característica de transferência.

Analisando o circuito e supondo o diodo como ideal, temos que para o semiciclo positivo da tensão de entrada, até esta atingir o valor da bateria V, o diodo estará cortado, pois a resultante das tensões faz com que ele fique reversamente polarizado, aparecendo na saída o próprio sinal de entrada.

Quando a tensão de entrada atingir o valor de V, o diodo entra em condução, fazendo a tensão de saída ser igual a V. A partir disso, a tensão de entrada atinge $V_{máx}$ e decresce, ficando essa variação como queda de tensão no resistor R, continuando a saída com o valor V.

Quando a tensão de entrada, decrescendo, atingir um valor menor que V, o diodo volta à condição de não condução, que prossegue durante todo o semiciclo negativo, fazendo com que na saída volte a aparecer o sinal de entrada. Teremos, portanto, no trecho compreendido entre V e $V_{máx}$, parte do semiciclo positivo ceifado, obtendo assim um circuito ceifador positivo.

Na curva de transferência temos uma reta inclinada de 45° com coeficientes de transferência iguais a 1, ou seja, toda tensão de entrada é transferida à saída sem modificações. Quando a tensão de entrada for maior que V, a característica de transferência é paralela ao eixo da tensão de entrada, fixada no valor V. Assim sendo, para toda variação da tensão de entrada, na saída, aparece esse valor.

Nas Figuras 43.2, 43.3 e 43.4 temos outros exemplos de circuitos ceifadores com suas características de transferência e tensões de entrada e de saída, cuja análise é análoga ao circuito já estudado.

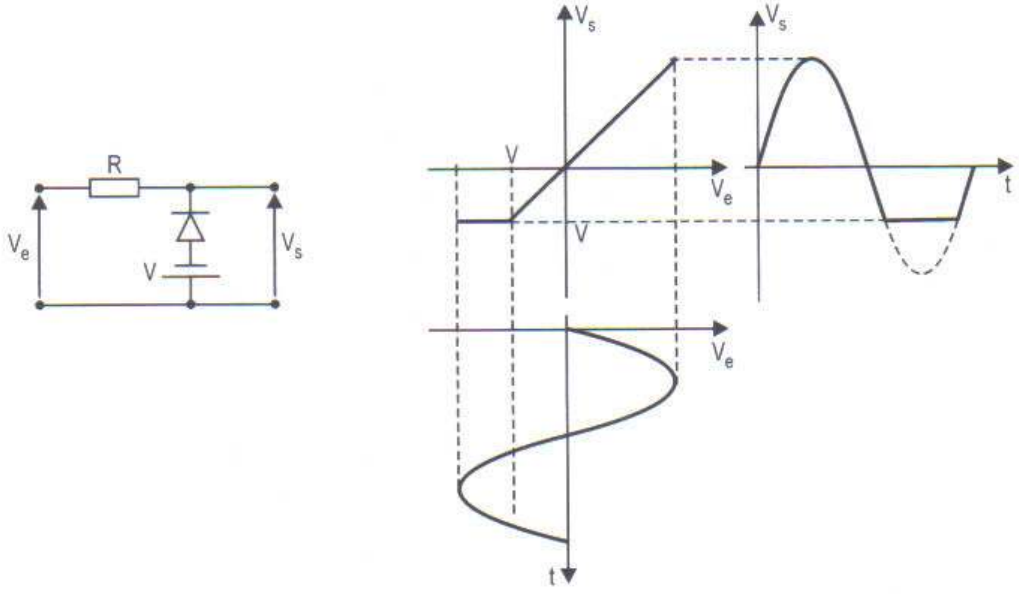


Figura 43.2 - Circuito ceifador negativo e característica de transferência.

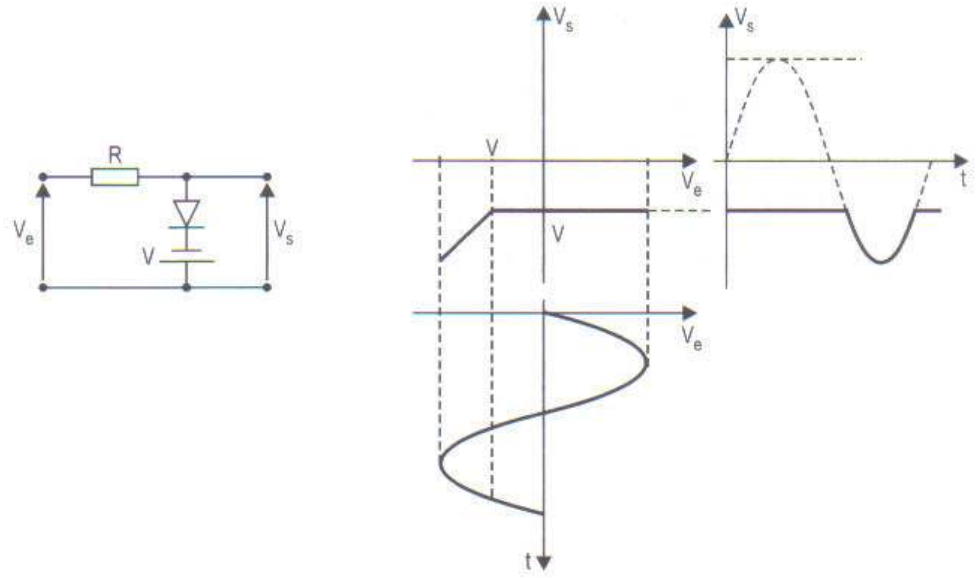


Figura 43.3 - Circuito ceifador positivo e característica de transferência.

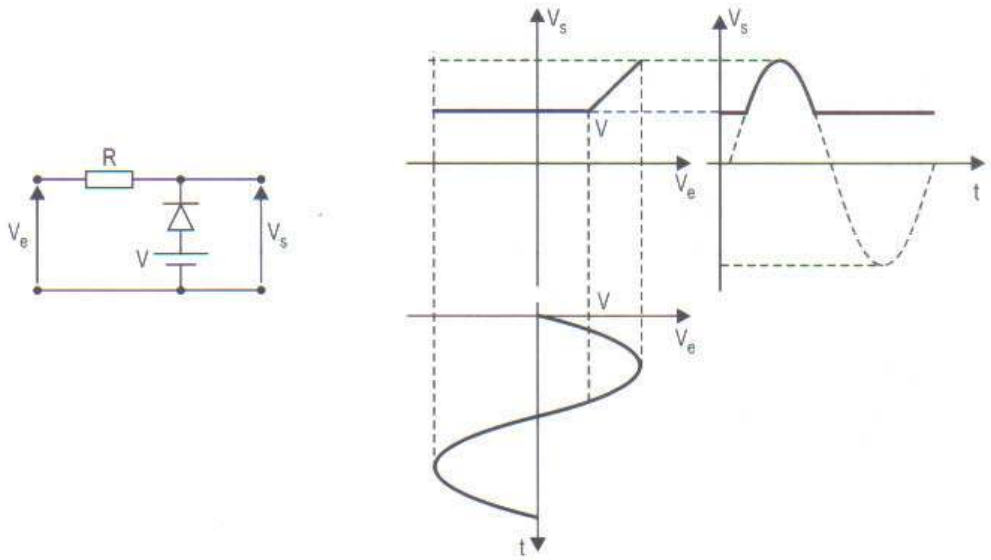


Figura 43.4 - Circuito ceifador negativo e característica de transferência.

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Fonte variável.
- Diodo: 1N 4007 (ou equivalente).
- Resistor: 1KΩ, 10KΩ e 100KΩ.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 43.5. Conecte à saída valores de R_L, conforme o Quadro 43.1. Para cada caso, meça V_s com o osciloscópio, deixando a chave AC-DC-O na posição DC. Anote o valor medido e a forma de onda de saída.

2) Com a varredura desligada, observe na tela a curva de transferência do circuito. Anote-a no Quadro 43.1.

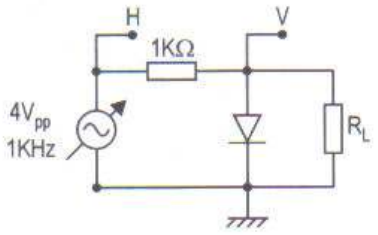


Figura 43.5

	$R_L = \infty$	$R_L = 100K\Omega$	$R_L = 10K\Omega$
Forma de onda			
Curva de transferência			

Quadro 43.1

3) Repita os itens 1 e 2 para os circuitos das Figuras 43.6, 43.7 e 43.8. Anote os resultados nos Quadros 43.2, 43.3 e 43.4 respectivamente.

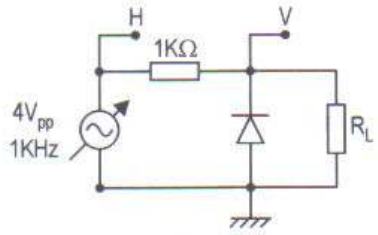


Figura 43.6

	$R_L = \infty$	$R_L = 100K\Omega$	$R_L = 10K\Omega$
Forma de onda			
Curva de transferência			

Quadro 43.2

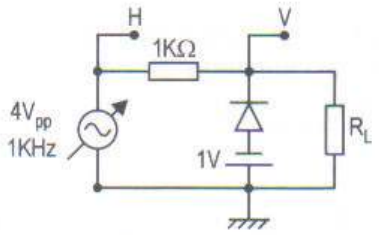


Figura 43.7

	$R_L = \infty$	$R_L = 100K\Omega$	$R_L = 10K\Omega$
Forma de onda			
Curva de transferência			

Quadro 43.3

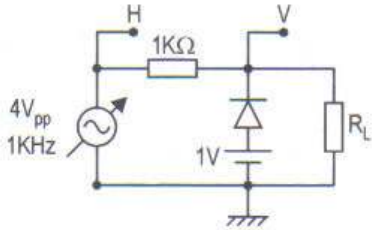


Figura 43.8

	$R_L = \infty$	$R_L = 100K\Omega$	$R_L = 10K\Omega$
Forma de onda			
Curva de transferência			

Quadro 43.4

Exercícios

1) Nos circuitos montados, qual é a influência do valor da carga na tensão de saída?

2) Por que com varredura desligada aparece na tela do osciloscópio a curva de transferência?

3) Analise os circuitos da Figura 43.9, determinando as formas de onda de saída e suas características de transferência, supondo os diodos ideais e como tensão de entrada onda senoidal alternada com $V_{e\ máx} > V$.

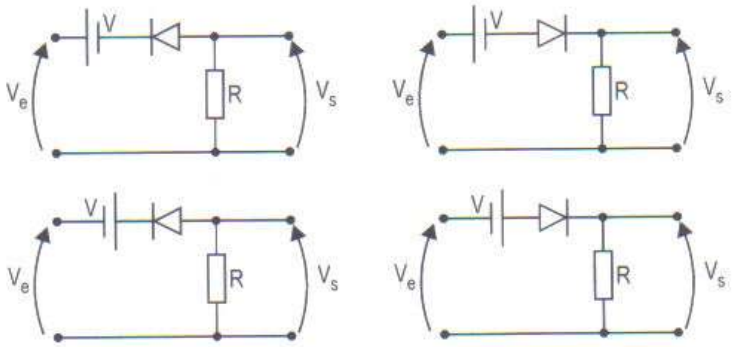


Figura 43.9

4) Para o circuito da Figura 43.10, desenhe a forma de onda de V_s devidamente cotada, bem como sua característica de transferência.

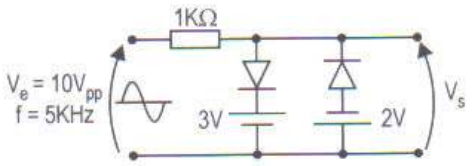


Figura 43.10

EXPERIÊNCIA

44

Circuitos Grampeadores

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, as formas de onda na saída dos circuitos grampeadores, bem como as suas curvas de transferência.

Teoria

Circuitos grampeadores são aqueles que somam um nível DC ao sinal aplicado em suas entradas. Consideremos a Figura 44.1, que apresenta a composição de uma bateria com uma fonte de tensão alternada (V_e).

Na saída temos a tensão alternada **grampeada** no nível DC da bateria (V). A Figura 44.2 mostra as formas de onda V e V_e, resultando o sinal V_s.

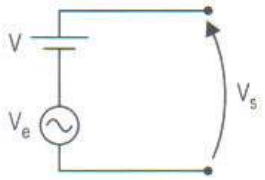


Figura 44.1 - Associação de uma bateria com uma fonte de tensão alternada.

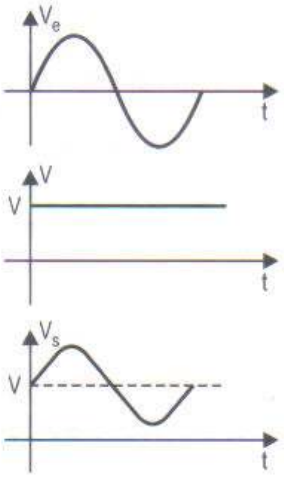


Figura 44.2 - Formas de onda da associação.

Da mesma forma, como nos circuitos ceifadores, para fins de análise, vamos utilizar a curva de transferência de cada circuito. Na Figura 44.3 temos um circuito grampeador, sua característica de transferência e os sinais de entrada e de saída.

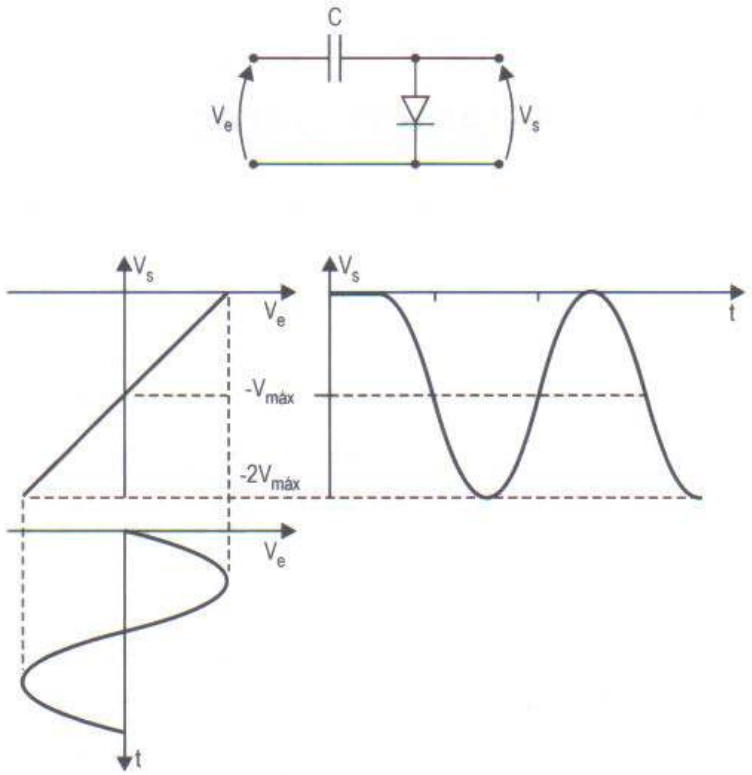


Figura 44.3 - Circuito grampeador e característica de transferência.

Supondo o diodo como ideal e o capacitor inicialmente descarregado, para o semiciclo positivo da tensão de entrada, até esta atingir $V_{máx}$, o diodo estará conduzindo e o capacitor se carregando com a própria tensão de entrada, resultando na saída uma tensão nula. A partir disso, no decréscimo do potencial de entrada, o diodo estará cortado, pois o resultante das tensões faz com que ele fique reversamente polarizado.

Nesta situação, à medida que o potencial decresce, aparece na saída um potencial negativo crescente, imposto conjuntamente pela tensão do capacitor e por esse potencial de entrada. Durante o semiciclo negativo, esta situação prossegue, pois o potencial do capacitor se soma ao da entrada, resultando na saída $-2V_{máx}$, quando a tensão de entrada atingir $-V_{máx}$.

Quando a tensão de entrada atingir o valor zero, a tensão de saída será igual a $-V_{máx}$, devido, exclusivamente, ao potencial armazenado pelo capacitor. A partir daí um novo semiciclo positivo vai ser subtraído do potencial do capacitor e quando atingir $+V_{máx}$, resultará em uma saída nula.

Caso o capacitor se descarregue, nesse intervalo voltaremos à situação transitória inicial, ou seja, carregando-se por meio da condução do diodo.

A curva de transferência resulta em uma reta inclinada de 45°, valendo para a situação de regime permanente, ou seja, após a situação transitória para a carga do capacitor.

A Figura 44.4 ilustra outro exemplo de circuito grampeador com sua característica de transferência e tensão de entrada e de saída, cuja análise é análoga à do circuito já estudado, somente que neste caso deve-se considerar o potencial da bateria em série com o diodo.

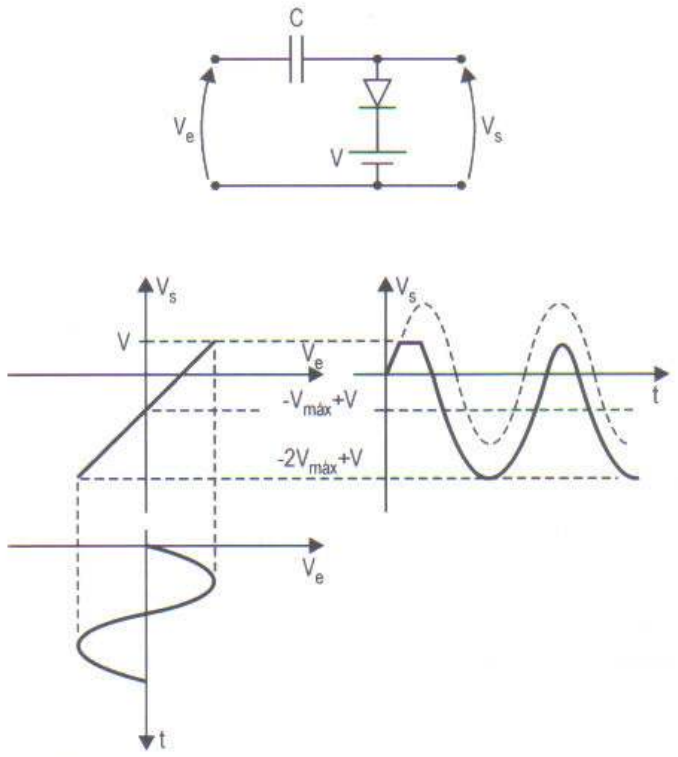


Figura 44.4 - Circuito grampeador polarizado e característica de transferência.

Material Experimental

- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Fonte variável.
- Diodo: 1N 4007 (ou equivalente).
- Capacitor: 1μF.
- Resistores: 1KΩ, 10KΩ e 100KΩ.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 44.5. Conecte à saída valores de R_L, conforme o Quadro 44.1. Para cada caso meça V_s com o osciloscópio, deixando a chave AC-DC-O na posição DC e a varredura ligada. Anote o valor medido e a forma de onda de saída.

2) Com a varredura desligada, observe na tela a curva de transferência do circuito. Anote-a no Quadro 44.1.

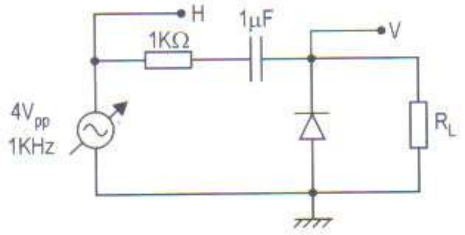


Figura 44.5

	$R_L = \infty$	$R_L = 100K\Omega$	$R_L = 10K\Omega$
Forma de onda			
Curva de transferência			

Quadro 44.1

3) Repita os itens 1 e 2 para os circuitos das Figuras 44.6, 44.7 e 44.8. Anote os resultados nos Quadros 44.2, 44.3 e 44.4 respectivamente.

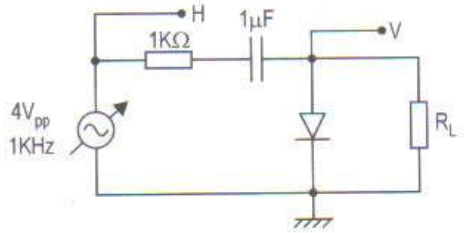


Figura 44.6

	$R_L = \infty$	$R_L = 100K\Omega$	$R_L = 10K\Omega$
Forma de onda			
Curva de transferência			

Quadro 44.2

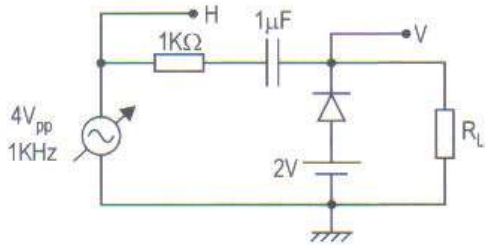


Figura 44.7

	$R_L = \infty$	$R_L = 100K\Omega$	$R_L = 10K\Omega$
Forma de onda			
Curva de transferência			

Quadro 44.3

Exercícios

1) Nos circuitos montados, qual é a influência do valor da carga na tensão de saída?

2) Analise os circuitos da Figura 44.8, determinando as formas de onda de saída e suas características de transferência, supondo os diodos ideais, e como tensão de entrada, onda senoidal alternada com $V_{e\ máx} > V$.

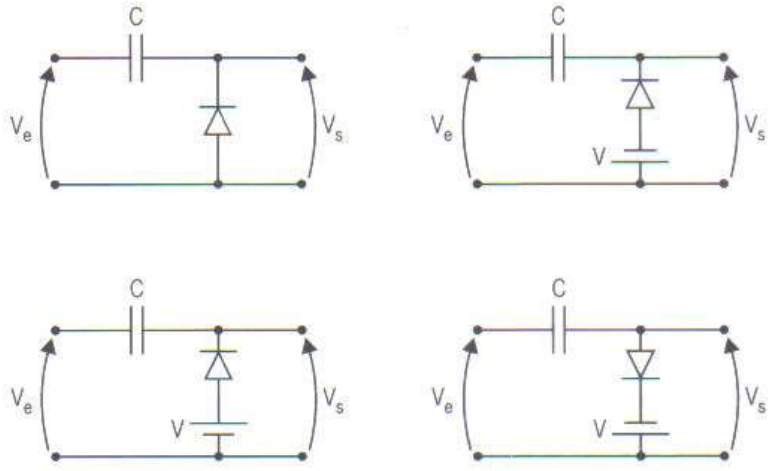


Figura 44.8

3) Esboce a forma de onda de Vs para o circuito da Figura 44.9, supondo o diodo ideal.

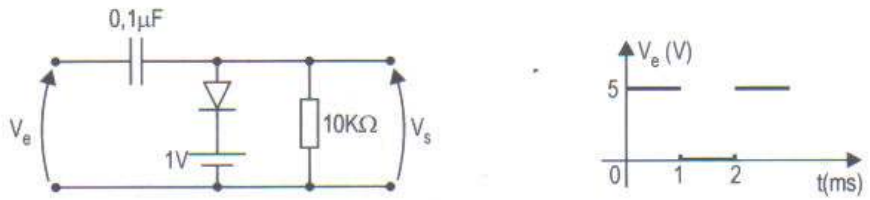


Figura 44.9

EXPERIÊNCIA

45

Multiplicadores de Tensão

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, as formas de onda na saída dos circuitos multiplicadores de tensão.

Teoria

Os circuitos multiplicadores de tensão são basicamente constituídos por retificadores que, em função do número de estágios, conseguem retificar e multiplicar o valor da tensão de pico de entrada. Logicamente que em uma fonte, com o aumento da tensão de saída, ocorre diminuição da corrente que ela pode fornecer.

Entre os circuitos multiplicadores de tensão destacamos os **dobradores**, **triplicadores** e **quadruplicadores de tensão**. A Figura 45.1 mostra dois tipos de circuitos dobradores de tensão.

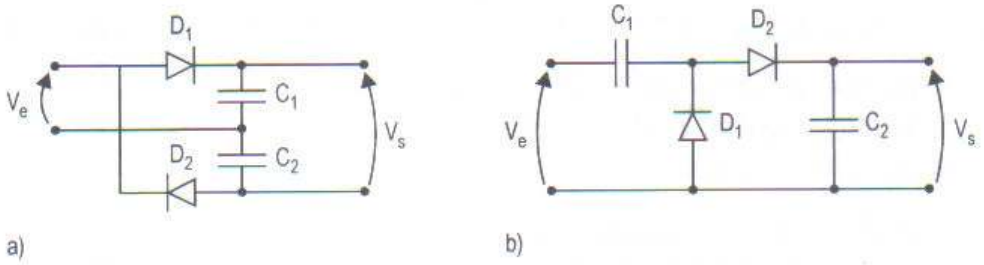


Figura 45.1 - Dobradores de tensão.

Analisando o circuito (a) da Figura 45.1, notamos que, ao aplicar à entrada uma onda senoidal, durante o semiciclo positivo, o diodo D_1 conduz e carrega o capacitor C_1 com $V_{máx}$, enquanto D_2 estará cortado, devido ao potencial positivo em seu catodo.

Durante o semiciclo negativo, D_2 estará conduzindo e carregando C_2 com $V_{máx}$, enquanto D_1 estará cortado. A tensão de saída será a soma do potencial em C_1 com o de C_2, resultando em $2V_{máx}$. Em função da carga o circuito pode apresentar um ripple acentuado, pois como vimos, a tensão de saída é obtida com a alternância do potencial dos capacitores.

Analisando o circuito (b) da Figura 45.1, nas mesmas circunstâncias que o anterior, durante o semiciclo negativo, o diodo D_1 estará conduzindo e carregando o capacitor C_1 com $V_{máx}$, enquanto D_2 estará cortado.

Durante o semiciclo positivo temos a soma do potencial de entrada com o armazenado em C_1, cortando o diodo D_1 e carregando C_2, através da condução de D_2, resultando na saída o potencial de $2V_{máx}$. Da mesma forma, em função da carga, o circuito pode apresentar na saída um ripple acentuado.

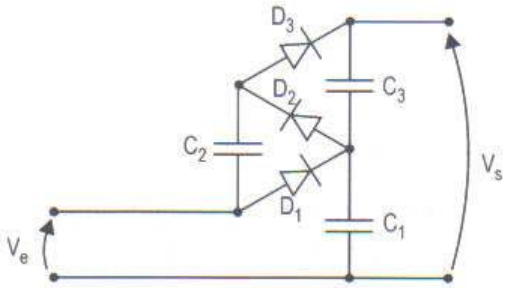


Figura 45.2 - Triplicador de tensão.

A Figura 45.2 mostra um circuito triplicador de tensão.

Analisando o circuito, temos que, durante o semiciclo positivo de V_e, D_1 estará conduzindo, carregando C_1 com $V_{máx}$, enquanto D_2 e D_3 estarão cortados. Durante o semiciclo negativo ocorre a soma do potencial de entrada com o armazenado em C_1, cortando D_1 e carregando C_2 através da condução de D_2 com $2V_{máx}$, enquanto D_3 estará cortado. A partir daí, durante um novo semiciclo positivo, há a soma do potencial de entrada com o armazenado em C_2, cortando D_1 e D_2 e carregando C_3 através da condução de D_3 com $2V_{máx}$, resultando na saída um potencial igual a $3V_{máx}$, considerando o potencial já armazenado em C_1.

Neste circuito existe o problema em relação ao ripple, mais intenso, em função da carga a ser ligada na saída, pois o regime transitório em relação aos outros é de maior duração.

À medida que aumentarmos o número de estágios, para formar outros multiplicadores de tensão, esta situação se agrava.

A Figura 45.3 exibe um circuito quadruplicador de tensão, cuja análise é análoga à dos circuitos já vistos, somente que neste caso, a saída é a soma dos potenciais armazenados em C_2 e em C_4, resultando em $4V_{máx}$.

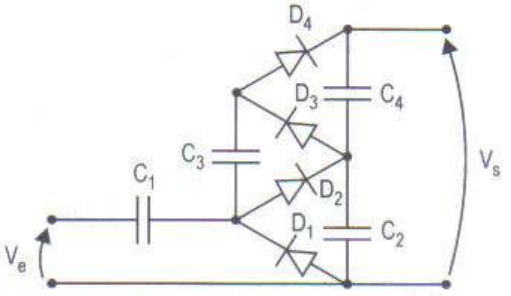


Figura 45.3 - Quadruplicador de tensão.

- Transformador: 110V/12V ou 220V/12V (conforme rede local).
- Diodos: 1N 4007 (três).
- Capacitores: 22μF/40V (três).
- Osciloscópio.
- Resistor: 10KΩ.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 45.4. Conecte à saída valores de R_L, conforme o Quadro 45.1. Para cada caso, meça com o osciloscópio V_{sDC} e V_{rpp} (tensão de ripple pico a pico). Anote os valores medidos no Quadro 45.1.

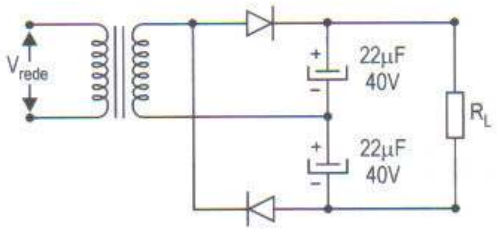


Figura 45.4

	$R_L = \infty$	$R_L = 10K\Omega$
V_{sDC}		
V_{rpp}		

Quadro 45.1

2) Repita o item 1 para os circuitos das Figuras 45.5 e 45.6. Anote os resultados nos Quadros 45.2 e 45.3 respectivamente.

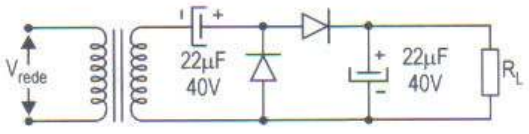


Figura 45.5

	$R_L = \infty$	$R_L = 10K\Omega$
V_{sDC}		
V_{rpp}		

Quadro 45.2

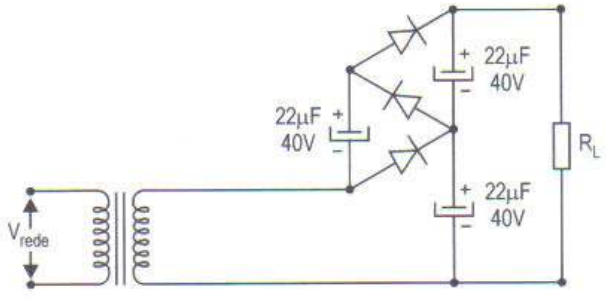


Figura 45.6

	$R_L = \infty$	$R_L = 10K\Omega$
V_{sDC}		
V_{rpp}		

Quadro 45.3

1) Nos circuitos montados, qual é a influência do valor da carga na tensão de saída?

2) Analise o funcionamento dos circuitos da Figura 45.7.

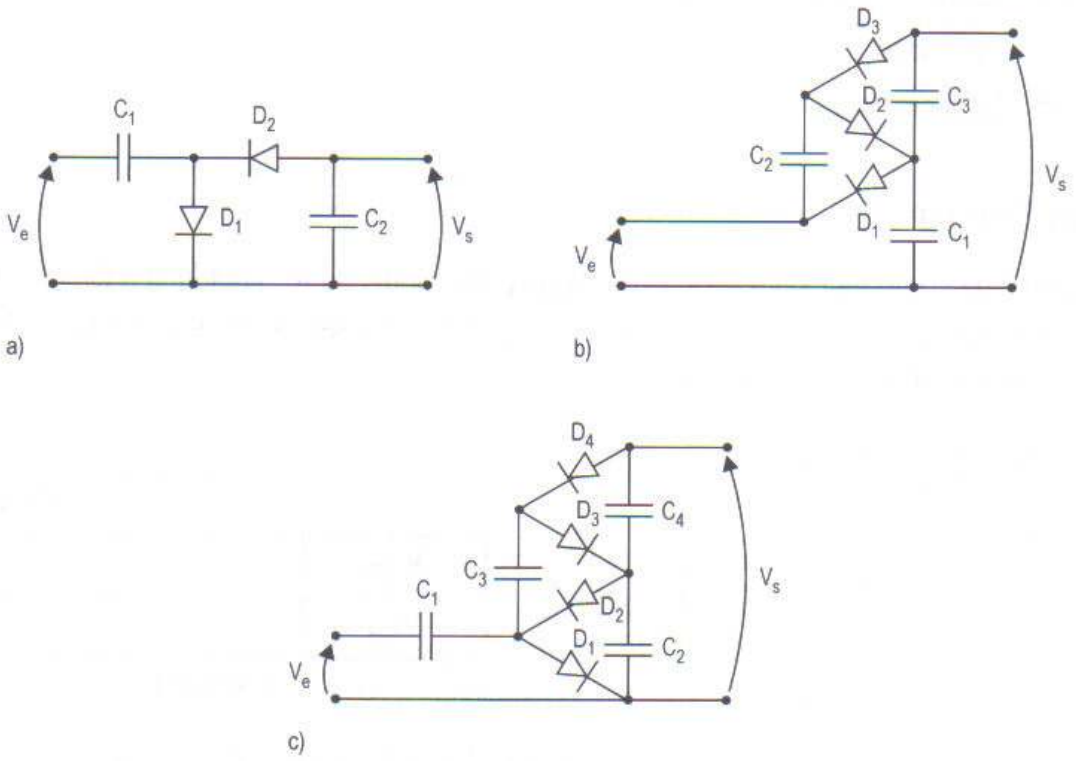


Figura 45.7

3) Compare os circuitos (a), (b) e (c) da Figura 45.7 com os das Figuras 45.1 (b), 45.2 e 45.3 respectivamente. O que você conclui?

EXPERIÊNCIA

46

Transistor

Objetivo

- Levantar, experimentalmente, as características de entrada e de saída de um transistor.

Teoria

Um transistor é basicamente constituído de três camadas de materiais semicondutores, formando as junções NPN ou PNP. Essas junções recebem um encapsulamento adequado, conforme o tipo de aplicação, e a ligação de três terminais para conexões externas. A Figura 46.1 mostra alguns tipos de encapsulamento conforme a faixa de potência.

Figura 46.1 - Transistores - (a) baixa potência; (b) média potência; (c) alta potência.

A Figura 46.2 exibe a estrutura das junções NPN e PNP não polarizadas.

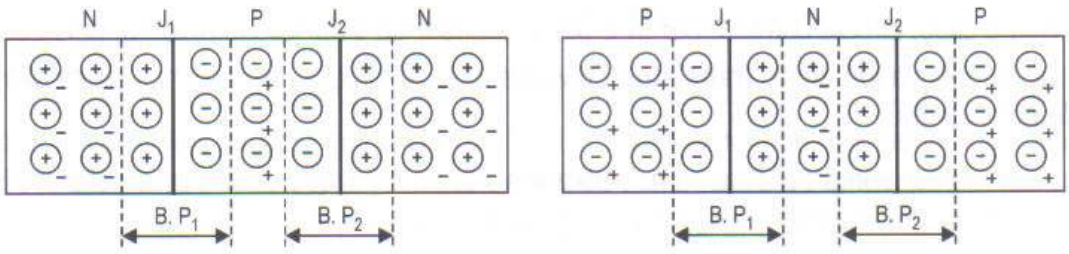


Figura 46.2 - (a) Junção NPN; (b) junção PNP.

Sem polarização, uma junção NPN ou PNP apresenta duas barreiras de potencial BP_1 e BP_2, idênticas àquela vista na junção PN de um diodo semicondutor. Para mover os elétrons e lacunas nos materiais, é necessária a colocação de baterias que podem deixar cada junção direta ou reversamente polarizada.

Em seguida vamos analisar todas as possibilidades de polarização, destacando o caso mais vantajoso.

1º caso: as duas junções reversamente polarizadas.

Figura 46.3 - Polarização reversa de J_1 e J_2.

Neste caso, não há circulação de corrente, pois as duas junções estão reversamente polarizadas, deixando o dispositivo em **situação de corte**.

2º caso: as duas junções diretamente polarizadas.

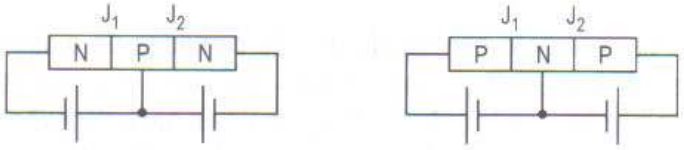


Figura 46.4 - Polarização direta de J_1 e J_2.

Neste caso, circula corrente pelas duas junções, estando o dispositivo em **situação de saturação**.

3º caso: J_1 diretamente polarizada e J_2 reversamente polarizada.

Figura 46.5 - Polarização direta de J_1 e reversa de J_2.

Neste caso, circula corrente por J_1 e por J_2, apesar da polarização reversa, pois ocorre o fenômeno denominado **efeito transistor**. Devido a esse fenômeno, utilizaremos este caso para fins de polarização.

Para melhor compreensão, vamos utilizar a Figura 46.6 que descreve a polarização do terceiro caso com a estrutura interna das junções mais detalhadas.

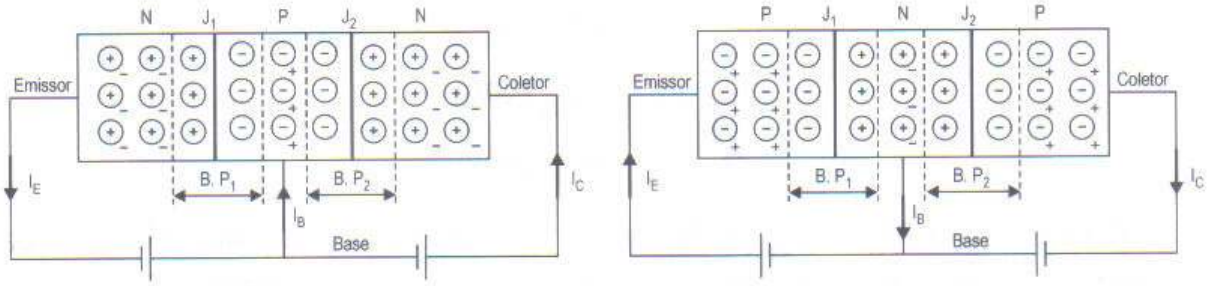


Figura 46.6 - Junções NPN e PNP polarizadas.

Considerando o transistor NPN, os J_1 elétrons, que são portadores majoritários do material N correspondente ao emissor, são injetados na região de base devido à polarização direta base-emissor (J_1).

Como a junção base-coletor (J_2) possui polarização reversa, os elétrons injetados no interior da base, provenientes do emissor, são atraídos para o coletor devido à tensão positiva presente nesse terminal. Passando pela junção base-coletor, temos uma corrente de elétrons praticamente igual àquela que passa pela junção base-emissor, ou seja, há ganho de corrente, pois a junção base-coletor está reversamente polarizada. Esse fenômeno é denominado **efeito transistor**, pois ocorre uma amplificação da corrente circulante na junção base-coletor.

Os terminais do transistor recebem as denominações **emissor (E)**, **base (B)** e **coletor (C)**, pois por meio da polarização, o primeiro emite portadores de carga à região central denominada base e são coletados pelo terceiro terminal.

O funcionamento do transistor PNP é análogo ao do NPN, somente que neste caso os portadores de carga são as lacunas, invertendo o sentido de todas as correntes, conforme mostrado na Figura 46.6.

A Figura 46.7 representa a simbologia dos transistores NPN e PNP, correntes e tensões para a devida polarização.

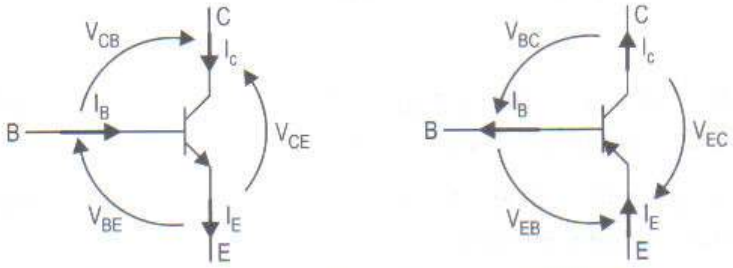


Figura 46.7 - (a) Transistor NPN; (b) transistor PNP.

Observando a Figura 46.7, notamos que a corrente de emissor (I_E) é composta pela soma das correntes de base (I_B) e de coletor (I_c). Analogamente, observamos que a tensão entre coletor-emissor (V_{CE} ou V_{EC}) é composta pela soma das tensões base-emissor (V_{BE} ou V_{EB}) e base-coletor (V_{CB} e V_{BC}). Portanto, podemos escrever:

$$I_E = I_B + I_c$$

$$V_{CE} = V_{BE} + V_{CB} \text{ (NPN)}$$

$$V_{EC} = V_{EB} + V_{BC} \text{ (PNP)}$$

A tensão V_{BE} (NPN) ou V_{EB} (PNP) aparece nos transistores pela polarização direta da junção base-emissor, devido aos íons que aparecem na barreira de potencial. Essa tensão para os transistores de silício está entre 0,5 e 0,8V.

Para fins de análise, relacionando entrada e saída, podemos considerar um transistor como um quadripolo. Isso é feito levando em conta um dos terminais como referência, comum à entrada e à saída. A Figura 46.8 mostra um quadripolo com as tensões e correntes.

Figura 46.8 - Quadripolo.

Observando a figura, notamos que V_1 e I_1 representam tensão e corrente de entrada, V_2 e I_2 tensão e corrente de saída. Como o ganho de um quadripolo é definido pela relação entre os parâmetros de saída e de entrada, podemos escrever:

$$A_I = \frac{I_2}{I_1} \text{ - ganho de corrente}$$

$$A_V = \frac{V_2}{V_1} \text{ - ganho de tensão}$$

$$A_P = \frac{V_2 \cdot I_2}{V_1 \cdot I_1} \text{ - ganho de potência}$$

Considerando o transistor como um quadripolo, podemos ter três configurações típicas, sendo base comum, coletor comum e emissor comum.

A configuração base comum é vista na Figura 46.9, na qual o terminal de base serve como ponto comum à entrada e à saída.

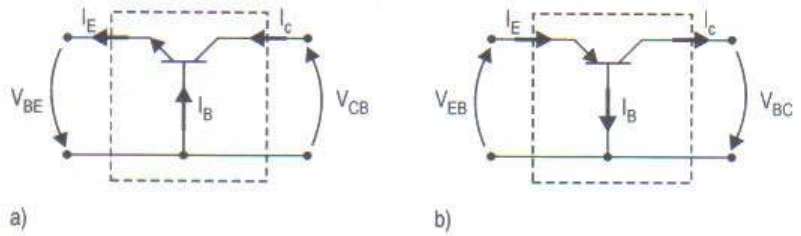


Figura 46.9 - Configuração base comum - (a) TR NPN; (b) TR PNP.

Nesse tipo de configuração podemos escrever:

$$A_I = \frac{I_c}{I_E} < 1, \text{ pois } I_c < I_E$$

$$A_V = \frac{V_{CB}}{V_{BE}} > 1, \text{ pois } V_{CB} > V_{BE}$$

$$A_P = \frac{V_{CB} \cdot I_c}{V_{BE} \cdot I_E} > 1$$

A configuração coletor comum está na Figura 46.10, na qual o coletor é ponto comum.

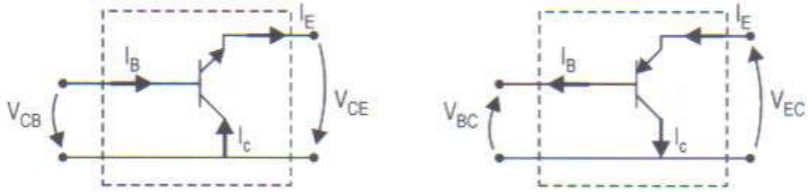


Figura 46.10 - Configuração coletor comum - (a) TR NPN; (b) TR PNP.

Nesse tipo de configuração podemos escrever:

$$A_I = \frac{I_E}{I_B} > 1, \text{ pois } I_E > I_B$$

$$A_V = \frac{V_{CE}}{V_{CB}} \approx 1, \text{ pois } V_{CE} \approx V_{CB}$$

$$A_P = \frac{V_{CE} \cdot I_E}{V_{CB} \cdot I_B} > 1$$

A configuração emissor comum encontra-se na Figura 46.11, em que o emissor é ponto comum.

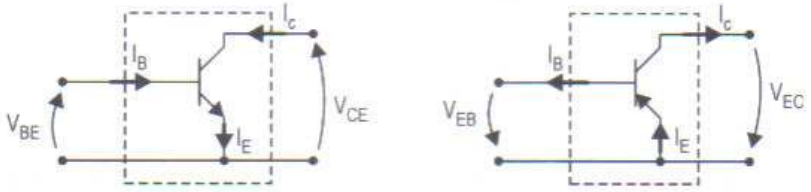


Figura 46.11 - Configuração emissor comum - (a) TR NPN; (b) TR PNP.

Nesse tipo de configuração podemos escrever:

$$A_I = \frac{I_c}{I_B} > 1 \text{, pois } I_c > I_B$$

$$A_V = \frac{V_{CE}}{V_{BE}} > 1 \text{, pois } V_{CE} > V_{BE}$$

$$A_P = \frac{V_{CE} \cdot I_c}{V_{BE} \cdot I_B} > 1$$

Das três configurações vistas, temos que a configuração emissor comum é a que apresenta ganho maior que um, nos três parâmetros, sendo por isso a mais utilizada em circuitos amplificadores.

Na configuração base comum, o ganho em corrente recebe a denominação α, portanto:

$$\alpha = \frac{I_c}{I_E}$$

e na configuração emissor comum, o ganho em corrente recebe a denominação β, portanto:

$$\beta = \frac{I_c}{I_B}$$

Para fins de projetos com transistores, o fabricante fornece uma faixa de valores para o parâmetro α ou para o parâmetro β. Esses parâmetros podem ser relacionados da seguinte forma:

$$I_E = I_B + I_c$$

em que: $$I_B = \frac{I_c}{\beta} \quad \text{e} \quad I_E = \frac{I_c}{\alpha}$$

substituindo, temos: $$\frac{I_c}{\alpha} = \frac{I_c}{\beta} + I_c \quad \text{ou} \quad \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{\beta} + 1$$

em que: $$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \text{e} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Por ser a configuração emissor comum a mais aplicada em circuitos amplificadores, é necessário relacionar, por meio de uma curva característica, seus principais parâmetros de entrada e de saída para a devida utilização em projetos.

Para levantar essa curva característica, se faz necessária uma polarização para fornecer ao transistor os parâmetros já citados. A Figura 46.12 mostra um transistor NPN polarizado com os instrumentos para a leitura da corrente de base, de coletor, das tensões entre base e emissor e entre coletor e emissor.

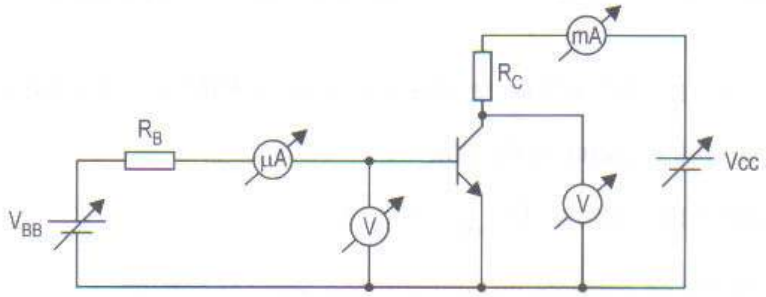


Figura 46.12 - Polarização do TR NPN para levantamento de curvas características.

Para levantar a curva característica de entrada, devemos variar a corrente de base e medir a tensão entre base e emissor, mantendo uma determinada tensão entre coletor e emissor constante. Essa característica é indicada na Figura 46.13.

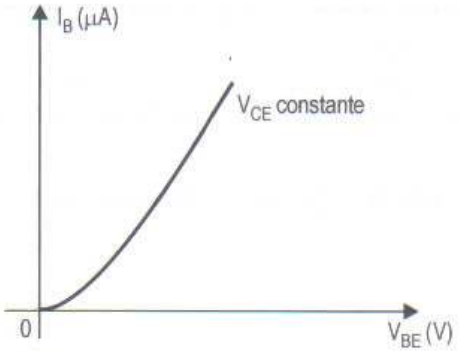


Figura 46.13 - Característica de entrada de um transistor.

Para levantar a curva característica de saída, devemos fixar valores da corrente de base, variar a tensão entre coletor e emissor e medir a corrente de coletor. Essa característica é vista na Figura 46.14.

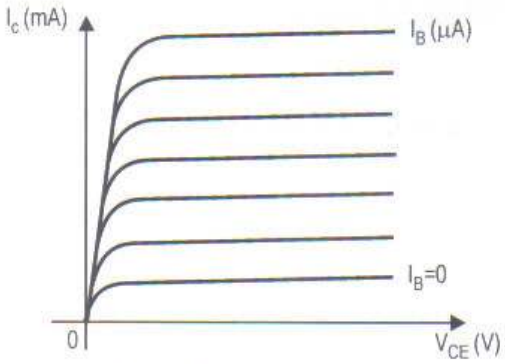


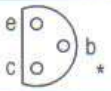
Figura 46.14 - Característica de saída de um transistor.

Notamos pela característica que para $I_B = 0$ aparece uma pequena corrente de coletor que é denominada corrente de fuga e, normalmente, representada por I_{CEO} (corrente entre coletor e emissor com base em aberto).

Além dessas curvas características, o fabricante fornece valores limite dos parâmetros. São eles:

- $V_{CEO\ máx}$: tensão máxima entre coletor e emissor com a base em aberto.
- $I_{c\ máx}$: corrente máxima de coletor.
- $P_{c\ máx}$: potência máxima ($P_{c\ máx} = V_{CE} \cdot I_c$).
- h_{fe} (β): ganho de corrente na configuração emissor comum.

Para exemplificar, a Figura 46.15 mostra esses parâmetros para dois transistores comuns de baixo sinal.

Transistor	Polarização	$V_{CEOmáx}$ (V)	$I_{cmáx}$ (mA)	$P_{cmáx}$ (mW)	hfe para I_c = 2mA	Disposição dos terminais
BC548	NPN	30	100	500	110-800	
BC558	PNP	30	100	500	75-475	

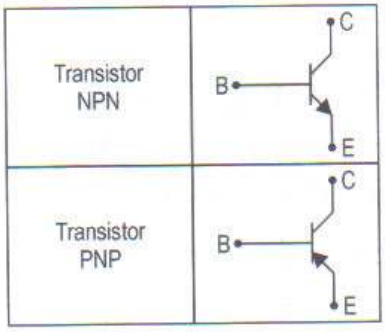
* vista inferior

Figura 46.15 - Especificações de TR de baixo sinal.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 22Ω/1,15W e 2,7KΩ.
- Potenciômetros: 100Ω (LIN) e 1KΩ (LIN).
- Transistores: BC548 ou equivalente.
- Multímetro.
- Miliamperímetros: 0-1mA e 0-100mA.

Simbologia



Parte Prática

1) Meça com o ohmímetro e anote no Quadro 46.1 as resistências direta e reversa entre base-emissor e entre base-coletor.

	Base-emissor	Base-coletor
R_{Direta}		
$R_{Reversa}$		

Quadro 46.1

2) Monte o circuito da Figura 46.16.

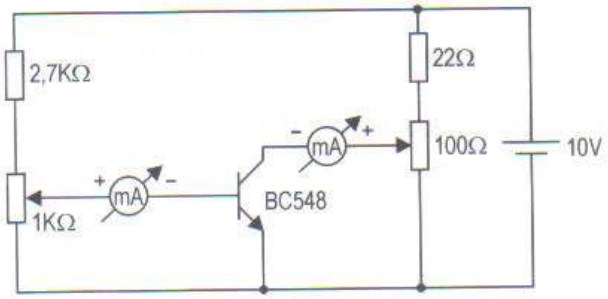


Figura 46.16

3) Varie a tensão V_{BE} utilizando o potenciômetro de 1KΩ, conforme o Quadro 46.2. Para cada caso, meça e anote a corrente de base, mantendo constante, por meio do potenciômetro de 100Ω, a tensão V_{CE} em 3V.

V_{BE} (V)	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,75
I_B (mA)									

Quadro 46.2

4) Ajuste a corrente de base em 0mA utilizando o potenciômetro de 1KΩ. Varie a tensão V_{CE}, conforme o Quadro 46.3, por meio potenciômetro de 100Ω. Para cada caso, meça e anote o valor da corrente I_c.

V_{CE} (V)	0	1	2	3	4	5	I_B (mA)
I_c (mA)							0
							0,05
							0,1
							0,15
							0,20

Quadro 46.3

5) Repita o item 4 para os demais valores de I_B, conforme o Quadro 46.3, mantendo-o constante para os valores ajustados de V_{CE}.

Exercícios

1) Como você testaria um transistor com o ohmímetro?

2) Com os dados do Quadro 46.2 construa a característica de entrada do transistor $I_B = f(V_{BE})$.

3) Com os dados do Quadro 46.3 construa a característica de saída do transistor $I_c = f(V_{CE})$.

4) Escolha cinco pontos da característica de saída e para cada um calcule o parâmetro β.

5) Por meio dos parâmetros β da questão 4, determine os parâmetros α correspondentes.

EXPERIÊNCIA

47

Polarização de Transistores

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, os tipos de polarização de um transistor na configuração emissor comum.

Teoria

Define-se polarização como o estabelecimento das correntes de coletor, de base e da tensão V_{CE}, ou seja, do ponto de trabalho do transistor. Para melhor aproveitamento, devemos polarizar a junção base-emissor diretamente e a junção base-coletor reversamente. Para tanto, utilizaremos no circuito duas baterias, V_{BB} e V_{cc}, resistores limitadores de corrente, conforme mostra a Figura 47.1.

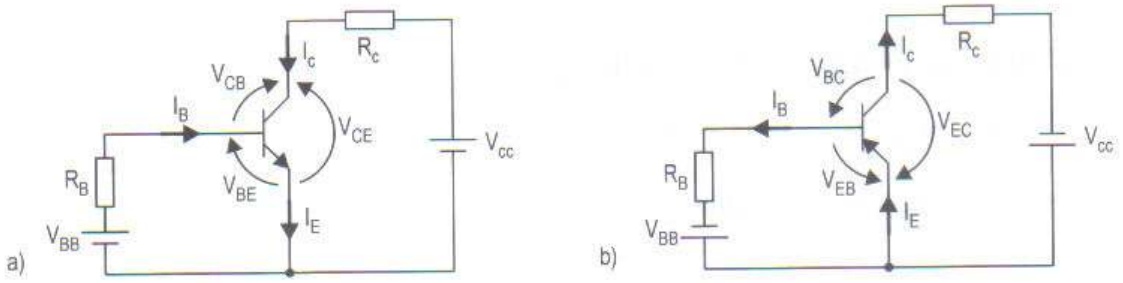


Figura 47.1 - Polarização de transistores - (a) TR. NPN; (b) TR. PNP.

Considerado a Figura 47.1(a), vamos escrever as equações das malhas de entrada e de saída:

- malha de entrada: $V_{BB} = R_B \cdot I_B + V_{BE}$
- malha de saída: $V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{CE}$

Para dimensionar R_B e R_c em função de valores preestabelecidos de V_{BB}, V_{cc}, I_B, V_{CE} e dos parâmetros do transistor, nas equações de malha isolamos esses valores:

$$R_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{I_B}$$

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{CE}}{I_c}$$

em que:

$$I_c = \beta I_B$$

Na prática, não é viável a utilização de duas baterias. Para eliminar uma delas formamos divisores de tensão que equivalem em nível de polarização às condições preestabelecidas. O circuito equivalente à bateria V_{BB} eliminada é visto na Figura 47.2.

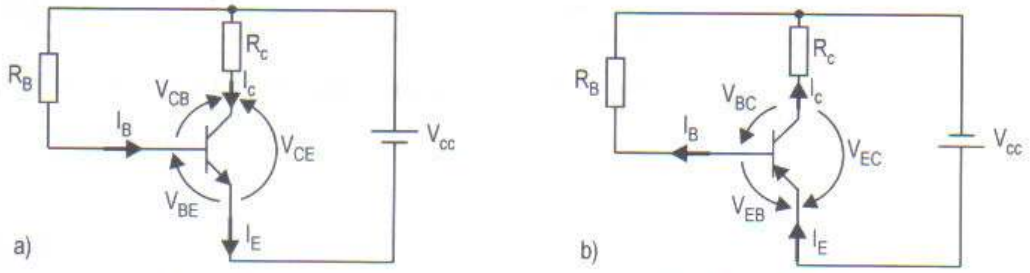


Figura 47.2 - Polarização com uma bateria (a) TR.NPN; (b) TR.PNP.

Podemos notar na figura que, apesar de a bateria V_{BB} ter sido eliminada, a junção base-emissor está diretamente polarizada e a junção base-coletor reversamente polarizada, desde que o resistor R_B seja maior que o resistor R_c.

Considerando a Figura 47.2 (a), vamos escrever as equações das malhas de entrada e de saída:

- malha de entrada: $V_{cc} = R_B \cdot I_B + V_{BE}$
- malha de saída: $V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{CE}$

Dimensionando R_B e R_c, temos:

$$R_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{I_B}$$

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{CE}}{I_c}$$

sendo:

$$I_c = \beta I_B$$

Um transistor sofre influência da temperatura, alterando a corrente de fuga, o parâmetro β e a tensão V_{BE}. O circuito de polarização, visto anteriormente, denomina-se **circuito de**

polarização com corrente de base constante, no qual a corrente de base não varia, pois V_{cc} e R_B são constantes e a variação de V_{BE} com a temperatura é praticamente desprezível.

Como as variações da corrente de fuga e do parâmetro β com a temperatura são acentuadas, o circuito sofre influência da temperatura, variando principalmente a corrente de coletor, tornando-se instável. Para contornar este problema colocamos em série com o emissor um resistor (R_E), conforme mostra a Figura 47.3.

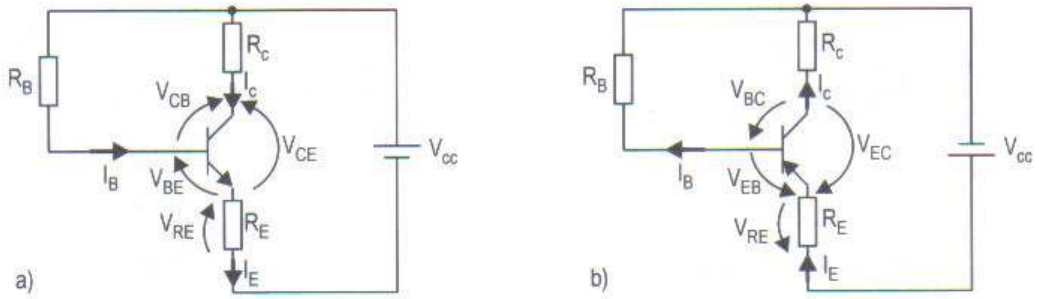


Figura 47.3 - Polarização com resistor de emissor (a) TR.NPN; (b) TR.PNP.

O resistor R_E, percorrido pela corrente de emissor I_E, apresenta uma queda de tensão V_{RE} que tende a variar conforme a corrente de coletor. Num possível aumento da corrente de coletor com o aumento da temperatura, V_{RE} tende a aumentar, diminuindo V_{RB} para compensar a equação da malha de entrada.

Se V_{RB} diminui, consequentemente I_B também diminui e com isso ocorre diminuição de I_c, pois $I_c = \beta I_B$, compensando a variação e dando maior estabilidade em relação às variações de temperatura ao circuito. Por este motivo o circuito recebe a denominação **polarização com corrente de emissor constante**.

Considerando a Figura 47.3 (a), vamos escrever as equações das malhas de entrada e de saída:

- malha de entrada: $V_{cc} = R_B \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E$
- malha de saída: $V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{CE} + R_E \cdot I_E$

Dimensionando os resistores, temos:

$$R_B = \frac{V_{cc} - V_{BE} - R_E \cdot I_E}{I_B}$$

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{CE} - R_E \cdot I_E}{I_c}$$

sendo:

$$I_c = \beta I_B$$

Normalmente, para o dimensionamento de R_B e R_c escolhe-se um valor para R_E e aplicam-se as equações vistas.

Uma melhor solução para o problema da instabilidade, principalmente com a temperatura, é polarizar o transistor, utilizando o circuito da Figura 47.4, denominado **polarização por divisor de tensão na base**.

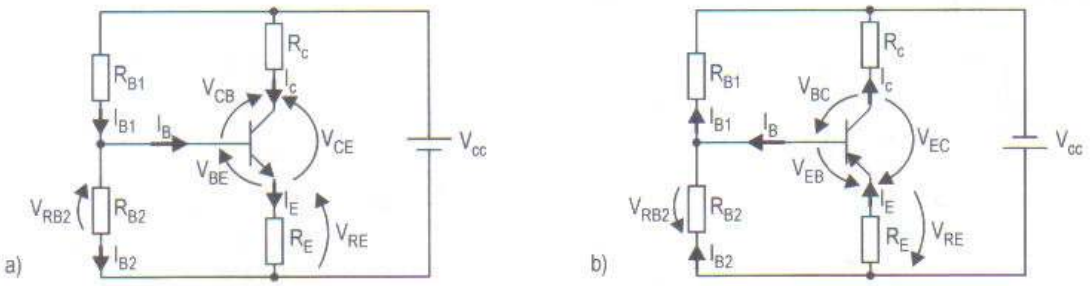


Figura 47.4 - Polarização por divisor de tensão (a) TR.NPN; (b) TR.PNP.

O divisor de tensão na base, se dimensionado de maneira conveniente, fixa V_{RB2}:

$$I_B \leq \frac{I_{B2}}{10}, \text{ pois } I_B = I_{B1} - I_{B2}$$

Sendo $V_{RB2} = V_{BE} + V_{RE}$, como V_{BE} e V_{RB2} praticamente não variam, temos a tensão V_{RE} mantida constante e, consequentemente, estabilizando a corrente de emissor e a de coletor, mantendo assim os parâmetros de polarização independentes das variações de β.

Para escrever as equações do circuito da Figura 47.5 (a), vamos utilizar o teorema de Thévenin entre os terminais de R_{B2}, calculando V_{Th} e R_{Th}.

$$V_{Th} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{cc}$$

$$R_{Th} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}$$

Substituindo no circuito o gerador equivalente de Thévenin, obtemos o circuito indicado na Figura 47.5.

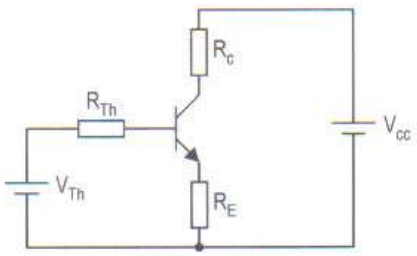


Figura 47.5 - Divisor de tensão na base substituído pelo gerador equivalente de Thévenin.

Assim sendo, podemos escrever as equações das malhas de entrada e de saída:

- malha de entrada: $V_{Th} = R_{Th} \cdot I_B + V_{BE} + R_E \cdot I_E$

substituindo V_{Th} e R_{Th}, temos:

$$\frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} \cdot V_{cc} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2} \cdot I_B}{R_{B1} + R_{B2}} + V_{BE} + R_E \cdot I_E$$

- malha de saída: $V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{CE} + R_E \cdot I_E$

Para exemplificar, vamos dimensionar os resistores de polarização para os três circuitos estudados, conforme segue:

Exemplo 1: Polarização com corrente de base constante

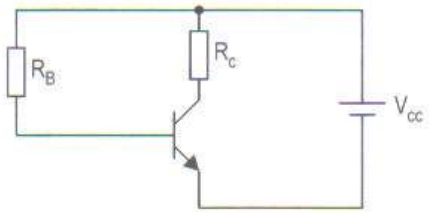


Figura 47.6 - Circuito com corrente de base constante.

Dados do TR:

$V_{BE} = 0{,}7V$

$\beta = 100$

Dados do projeto:

$V_{cc} = 10V$

$V_{CE} = \frac{V_{cc}}{2}$

$I_c = 10mA$

a) Cálculo de I_B

$$I_B = \frac{I_c}{\beta} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{100} = 100\,\mu A$$

b) Cálculo de R_B

$$R_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{I_B} = \frac{10 - 0{,}7}{100 \cdot 10^{-6}} = 93K\Omega$$

$$R_{B\,adotado} = 100K\Omega$$

c) Cálculo de R_C

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{CE}}{I_c} = \frac{10 - 5}{10 \cdot 10^{-3}} = 500\Omega$$

$$R_{c\,adotado} = 560\Omega$$

Exemplo 2: Polarização com corrente de emissor constante

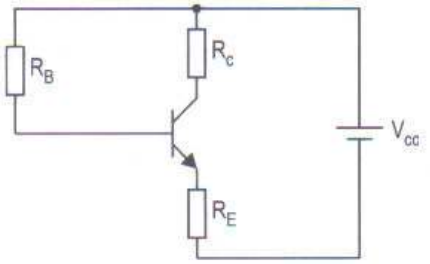


Figura 47.7 - Circuito com corrente de emissor constante.

Dados do TR:

$V_{BE} = 0{,}7V$

$\beta = 100$

Dados do projeto:

$V_{cc} = 10V$

$V_{CE} = \frac{V_{cc}}{2}$

$V_{RE} = \frac{V_{cc}}{10}$

$I_c = 20mA$

a) Cálculo da corrente de base

$$I_B = \frac{I_c}{\beta} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{100} = 200\mu A$$

b) Cálculo de R_B

$$R_B = \frac{V_{cc} - V_{BE} - V_{RE}}{I_B} = \frac{10 - 0{,}7 - 1}{200 \cdot 10^{-6}} = 41{,}5K\Omega$$

$$R_{B\ adotado} = 47K\Omega$$

c) Cálculo de R_C

$$R_C = \frac{V_{cc} - V_{CE} - V_{RE}}{I_c} = \frac{10 - 5 - 1}{20 \cdot 10^{-3}} = 200\Omega$$

$$R_{c\ adotado} = 220\Omega$$

d) Cálculo de I_E

$$I_E = I_B + I_c$$

$$I_E = 200 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 10^{-3}$$

$$I_E = 20{,}2mA$$

e) Cálculo R_E

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{1}{20{,}2 \cdot 10^{-3}} = 49{,}5\Omega$$

$$R_{E\ adotado} = 47\Omega$$

Exemplo 3: Polarização por divisor de tensão na base

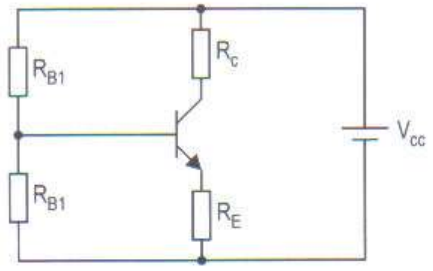


Figura 47.8 - Circuito com divisor de tensão na base.

Dados do TR:

$V_{BE} = 0{,}7V$

$\beta = 100$

Dados do projeto:

$V_{cc} = 10V$

$V_{CE} = \frac{V_{cc}}{2}$

$V_{RE} = \frac{V_{cc}}{10}$

$I_c = 20mA$

$I_B = \frac{I_{B2}}{10}$

a) Cálculo de I_B, I_{B1}, e I_{B2}

$$I_B = \frac{I_c}{\beta} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{100} = 200\mu A$$

$$I_{B2} = 10 \cdot I_B = 10 \cdot 200 \cdot 10^{-6} = 2mA$$

$$I_{B1} = I_{B2} + I_B = 2 \cdot 10^{-3} + 200 \cdot 10^{-6} = 2{,}2mA$$

b) Cálculo de R_{B2}

$$R_{B2} = \frac{V_{BE} + V_{RE}}{I_{B2}} = \frac{0{,}7 + 1}{2 \cdot 10^{-3}} = 850\Omega$$

$$R_{B2\ adotado} = 910\Omega$$

c) Cálculo de R_{B1}

$$R_{B1} = \frac{V_{cc} - V_{BE} - V_{RE}}{I_{B1}} = \frac{10 - 0{,}7 - 1}{2{,}2 \cdot 10^{-3}} = 3{,}77K\Omega$$

$$R_{B1\ adotado} = 3{,}9K\Omega$$

d) Cálculo de R_c

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{CE} - V_{RE}}{I_c} = \frac{10 - 5 - 1}{20 \cdot 10^{-3}} = 200\Omega$$

$$R_{c\ adotado} = 220\Omega$$

e) Cálculo de I_E

$$I_E = I_B + I_c$$

$$I_E = 200 \cdot 10^{-6} + 20 \cdot 10^{-3}$$

$$I_E = 20{,}2\,mA$$

f) Cálculo R_E

$$R_E = \frac{V_{RE}}{I_E} = \frac{1}{20{,}2 \cdot 10^{-3}} = 49{,}5\Omega$$

$$R_{E\ adotado} = 47\Omega$$

Material Experimental

- Fonte variável.
- Transistor: BC548 ou equivalente.
- Resistores: 100Ω, 330Ω, 1,2KΩ, 5,6KΩ e 150KΩ.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 47.9. Meça e anote no Quadro 47.1 os valores de I_B, I_c, I_E, V_{BE} e V_{CE}.

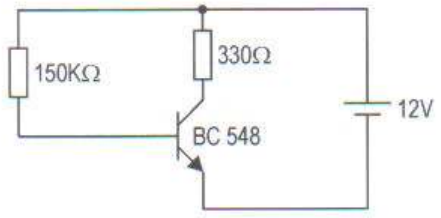


Figura 47.9

I_B	I_c	I_E	V_{BE}	V_{CE}

Quadro 47.1

2) Monte o circuito da Figura 47.10. Meça e anote no Quadro 47.2 os valores de I_B, I_c, I_E, V_{BE} e V_{CE}.

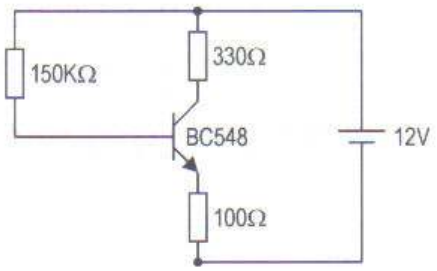


Figura 47.10

I_B	I_c	I_E	V_{BE}	V_{CE}

Quadro 47.2

3) Monte o circuito da Figura 47.11. Meça e anote no Quadro 47.3 os valores de I_B, I_c, I_E, V_{BE} e V_{CE}.

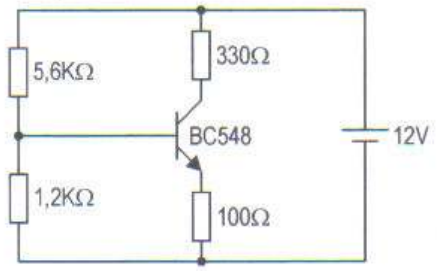


Figura 47.11

I_B	I_c	I_E	V_{BE}	V_{CE}

Quadro 47.3

Exercícios

1) Calcule o valor β, utilizando os valores de I_B e I_c, obtidos nos Quadros 47.1, 47.2 e 47.3. Calcule o β médio.

2) Dimensione R_B, R_c e R_E para polarizar o transistor do circuito da Figura 47.12, conforme os dados fornecidos.

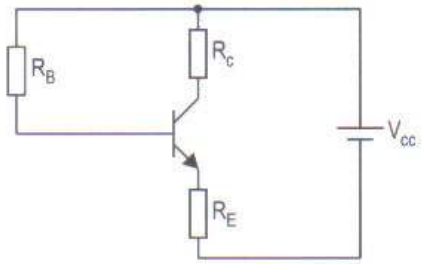


Figura 47.12

Dados do TR:

$\beta = 200$

$V_{BE} = 0{,}7V$

Dados do projeto:

$V_{cc} = 15V$

$V_{CE} = \frac{V_{cc}}{2}$

$V_{RE} = \frac{V_{cc}}{10}$

$I_c = 30mA$

3) Dimensione R_{B1}, R_{B2}, R_c e R_E para polarizar o transistor do circuito da Figura 47.13, conforme os dados fornecidos.

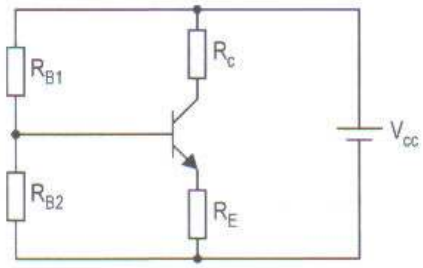


Figura 47.13

Dados do TR:

$\beta = 350$

$V_{BE} = 0{,}7V$

Dados do projeto:

$V_{cc} = 15V$

$V_{CE} = \frac{V_{cc}}{2}$

$V_{RE} = \frac{V_{cc}}{10}$

$I_c = 5mA$

$I_B = \frac{I_{B2}}{10}$

4) Dimensione R_B, R_c e R_E para polarizar o transistor do circuito da Figura 47.14, conforme os dados fornecidos.

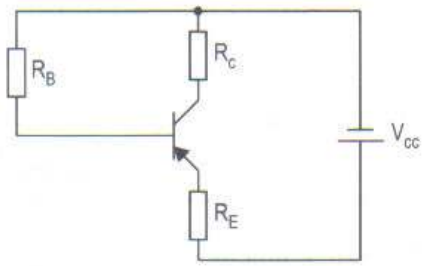


Figura 47.14

Dados do TR:

$\beta = 100$

$V_{EB} = 0{,}7V$

Dados do projeto:

$V_{cc} = 15V$

$I_B = 200\mu A$

$V_{EC} \cdot I_c = 40mW$

$R_c = 6 \cdot R_E$

EXPERIÊNCIA

48

Transistor como Chave

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o funcionamento de um transistor como chave.

Teoria

Conforme a polarização, um transistor pode operar em três regiões distintas, sendo a de corte, a ativa e a de saturação. Na região ativa, o transistor é utilizado, com a devida polarização, como amplificador. Nas regiões de corte e saturação, é utilizado como chave, ou seja, serve apenas para comutação, conduzindo ou não. Nesta situação, o transistor é utilizado, principalmente, no campo da eletrônica digital, sendo célula básica de uma série de dispositivos, normalmente agrupados dentro de circuitos integrados.

A Figura 48.1 apresenta a curva da corrente de coletor em função da corrente de base, mostrando o corte, a saturação e a região ativa.

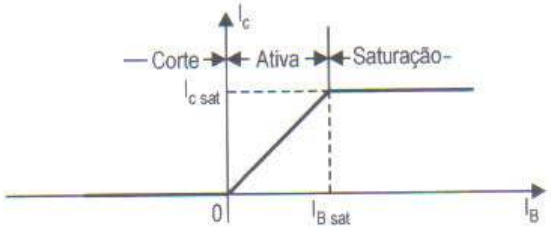


Figura 48.1 - Característica $I_c = f(I_B)$.

Notamos que, se trabalharmos com uma corrente de base menor ou igual a zero, o transistor opera na região de corte, ou seja, a corrente de coletor será nula. Se trabalharmos com uma corrente de base entre zero e um valor limite ($I_{B\,sat}$), opera na região ativa, ou seja, com uma corrente de coletor, conforme o valor de β ($I_c = \beta \cdot I_B$). Para uma corrente de base acima de $I_{B\,sat}$, opera na região de saturação, ou seja, circula pelo coletor uma corrente limite ($I_{c\,sat}$), imposta de acordo com a polarização.

Estas mesmas condições podem ser observadas na característica $I_c = f(V_{CE})$ do transistor, em que também podemos representar a **reta de carga** de um circuito de polarização. A Figura 48.2 mostra essa característica, bem como a reta de carga.

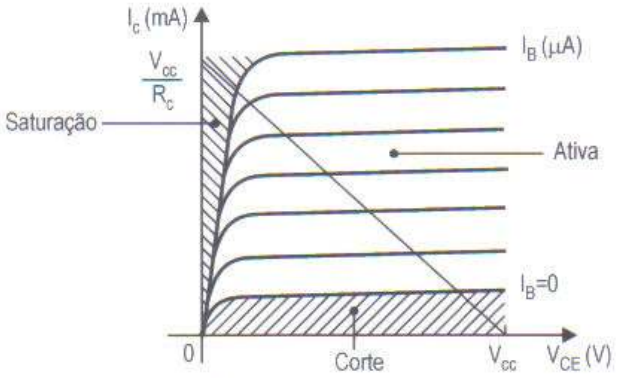


Figura 48.2 - Característica $I_c = f(V_{CE})$.

A reta de carga é obtida a partir da equação da malha de saída do circuito de polarização. No caso para fins de chaveamento, utilizamos o circuito de corrente de base constante. Escrevendo a equação da malha, temos:

$$V_{cc} = R_c \cdot I_c + V_{CE}$$

em que:

$$V_{CE} = V_{cc} - R_c \cdot I_c$$

fazendo $I_c = 0$, temos: $V_{CE} = V_{cc}$ (1º ponto da reta)

fazendo $V_{CE} = 0$, temos: $I_c = \frac{V_{cc}}{R_c}$ (2º ponto da reta)

Para fins de amplificação, o ponto de trabalho será localizado na região ativa. Em operação como chave, o ponto será localizado na região de corte ou na região de saturação (áreas hachuradas da característica $I_c = f(V_{CE})$ da Figura 48.2).

O circuito da Figura 48.3 mostra a configuração básica de um transistor operando como uma chave.

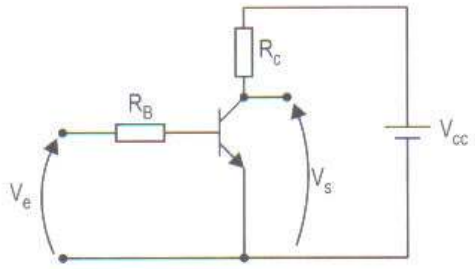


Figura 48.3 - Transistor operando como chave.

Para o transistor operar na situação de corte, ou seja, como chave aberta, é necessário que o potencial V_E seja menor que V_{BE} ou nulo. Nesta situação, não circula corrente de coletor, sendo V_s igual a V_{cc}.

Para o transistor operar na situação de saturação, ou seja, como chave fechada, é necessário que o potencial V_E seja maior que V_{BE}, dependendo do dimensionamento de R_B. Nesta situação, a corrente de coletor será a máxima possível, conforme o valor de R_c, sendo V_s igual a $V_{CE\ sat}$ (no máximo 0,3V).

Dimensionando R_c e R_B para a saturação do transistor, temos:

1) Cálculo de R_c

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{CE\,sat}}{I_c}$$

2) Cálculo de $I_{B\ sat}$

$$I_{B\ sat} = \frac{I_c}{\beta_{sat}}, \text{ em que } \beta_{sat} = 10 \text{ (pior caso possível de } \beta \text{ para garantia da saturação)}$$

3) Cálculo de R_B

$$R_B = \frac{V_E - V_{BE}}{I_{B\,sat}} \quad \text{se} \quad V_E = V_{cc},\ R_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{I_{B\,sat}}$$

Para exemplificar, vamos dimensionar R_B e R_c para que no circuito da Figura 48.4, estando a chave S na posição **1**, sature o transmissor, acendendo o LED (**diodo emissor de luz**), e na posição **2** corte o transistor, mantendo o LED apagado.

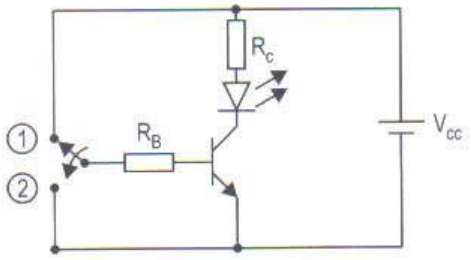


Figura 48.4 - Transistor como chave acionando um LED.

Dados do TR:	Dados do LED:	Dados do projeto:
$\beta_{sat} = 10$	$V_L = 1{,}7V$	$V_{cc} = 12V$
$V_{BE} = 0{,}7V$	$I_L = 20mA$	
$V_{CE\ sat} = 0{,}3V$		

1) Cálculo de R_c

$$R_c = \frac{V_{cc} - V_{CE\ sat} - V_L}{I_c} = \frac{12 - 0{,}3 - 1{,}7}{20 \cdot 10^{-3}} = 500\Omega$$

$$R_{c\,adotado} = 470\Omega$$

2) Cálculo de IB_{sat}

$$I_{B\,sat} = \frac{I_c}{\beta_{sat}} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{10} = 2mA$$

3) Cálculo de R_B

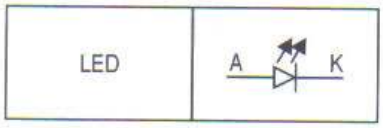
$$R_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{I_{B\,sat}} = \frac{12 - 0{,}7}{2 \cdot 10^{-3}} = 5{,}6K\Omega$$

$$R_{B\,adotado} = 5{,}6K\Omega$$

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistor: 470Ω e 5,6KΩ.
- Transistor: BC548 ou equivalente.
- LED: FLV 110.
- Multímetro.

Simbologia



Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 48.5.

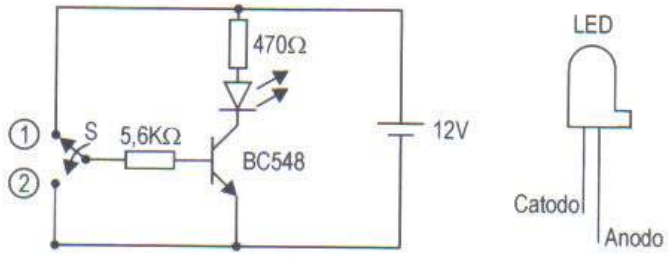


Figura 48.5

2) Com a chave na posição **1**, meça e anote no Quadro 48.1 os valores de I_B, I_c, V_{BE} e V_{CE}. Repita as medições com a chave na posição **2**, anotando os valores no mesmo quadro.

Chave S	I_B	I_c	V_{BE}	V_{CE}
pos 1				
pos 2				

Quadro 48.1

Exercícios

1) No circuito da Figura 48.5, modifique a posição do LED para acender quando a chave S for comutada para a posição 2 e apagar na posição 1.

2) No circuito da Figura 48.6, sabendo que todos os resistores de base estão dimensionados para a saturação dos transistores, preencha o Quadro 48.2, indicando a situação do LED em função da posição das chaves S_1 e S_2.

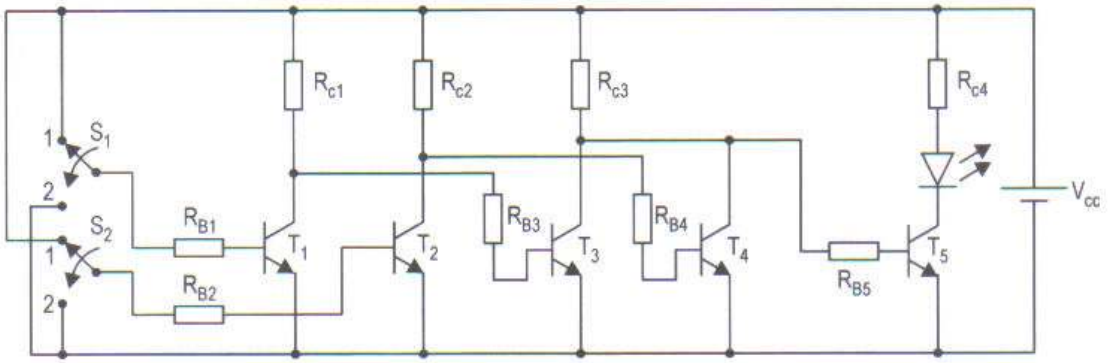
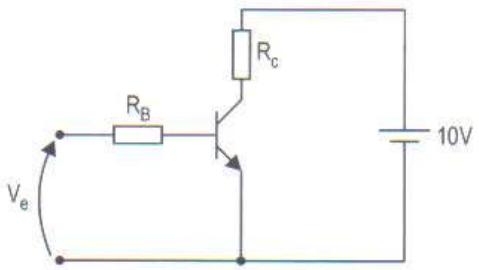


Figura 48.6

S_1	S_2	LED
1	1	
1	2	
2	1	
2	2	

Quadro 48.2

3) Dimensione R_c e R_B para o circuito da Figura 48.7 de tal forma a saturar o transistor na mudança de nível, conforme a característica da tensão de entrada.



Dados do TR:

$V_{BE} = 0{,}7V$

$\beta_{sat} = 10$

$V_{CE\,sat} = 0{,}3V$

Dados do projeto:

$I_c = 10mA$

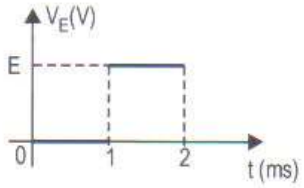


Figura 48.7

EXPERIÊNCIA

49

Amplificador de Pequenos Sinais

Objetivo

- Levantar a curva de respostas de um amplificador de pequenos sinais.

Teoria

Utilizando um transistor polarizado devidamente, podemos construir um circuito denominado amplificador, o qual deve apresentar na saída um sinal com as mesmas características do sinal aplicado à sua entrada, porém amplificado, ou seja, com ganho em amplitude.

Para a aplicação do sinal de entrada e como consequência a obtenção dele na saída, utilizam-se capacitores de acoplamento que, além disso, eliminam o nível DC, possibilitando que seja amplificada somente a variação de envoltória. Para melhor estabilidade, utiliza-se o circuito de polarização com divisor de tensão na base, que conforme visto, fixa o ponto de operação do transistor. O amplificador de pequenos sinais é visto na Figura 49.1.

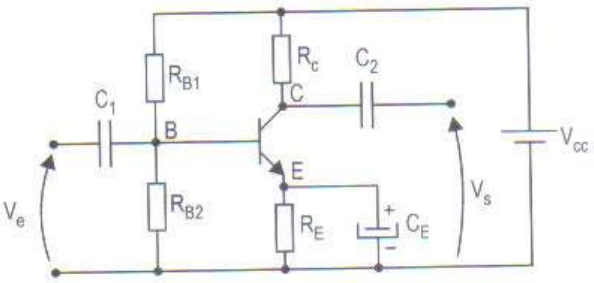


Figura 49.1 - Amplificador de pequenos sinais.

O sinal de entrada (V_e) é aplicado na base do transistor por meio do capacitor de acoplamento (C_1). Como esse sinal é isento de nível DC, filtrado por C_1, não altera a polarização do transistor, mas faz com que haja uma variação na corrente de base em torno do ponto de operação, tendo esta variação as mesmas características, conforme V_e.

A corrente de coletor varia da mesma forma, porém amplificada de acordo com o ganho β, pois $I_c = \beta \cdot I_B$. Essa variação provoca, analogamente, uma variação de tensão no resistor de coletor, fazendo aparecer na saída um sinal com as mesmas características do sinal de entrada, porém amplificado e defasado de 180°, pois a variação positiva do sinal de entrada

representa um aumento da corrente de coletor e, consequentemente, um decréscimo da tensão de saída.

O capacitor (C_E) em paralelo com o resistor (R_E) serve para neutralizar a queda de sinal no resistor de emissor, pois para fins de tensão contínua de polarização (V_{RE}) se carrega com esse valor e comporta-se como um curto-circuito para o sinal de entrada, fazendo com que toda variação seja aplicada entre base e emissor. A Figura 49.2 exibe as formas de onda nos principais pontos do circuito, supondo que o sinal de entrada seja uma tensão alternada senoidal.

O ganho de tensão de um amplificador representa a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada. Sendo assim, podemos escrever:

$$A_v = \frac{V_s}{V_e}$$

Para fins de dimensionamento da polarização, devemos utilizar a característica do transistor $I_c = f(V_{CE})$, traçar a reta de carga e localizar o ponto de trabalho de tal forma que o sinal de entrada não atinja as regiões de corte ou de saturação, evitando distorções no sinal de saída.

A Figura 49.3 mostra a característica $I_c = f(V_{CE})$ com a reta de carga e sinais de entrada e de saída.

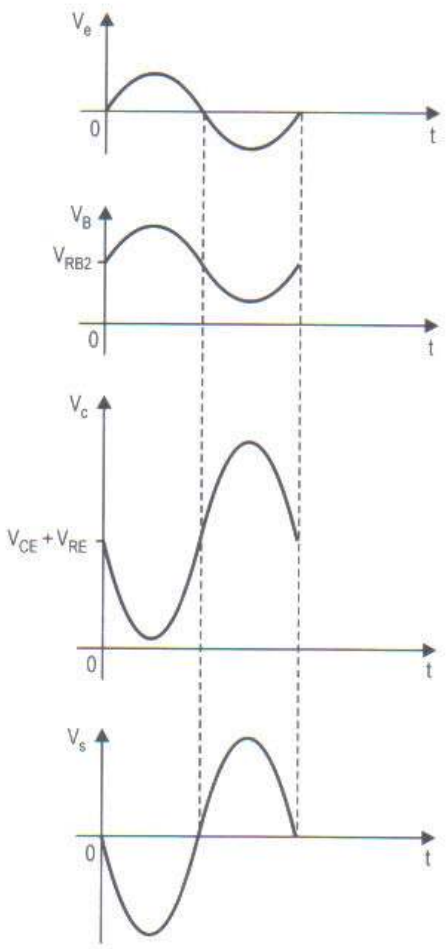


Figura 49.2 - Formas de onda do amplificador de pequenos sinais.

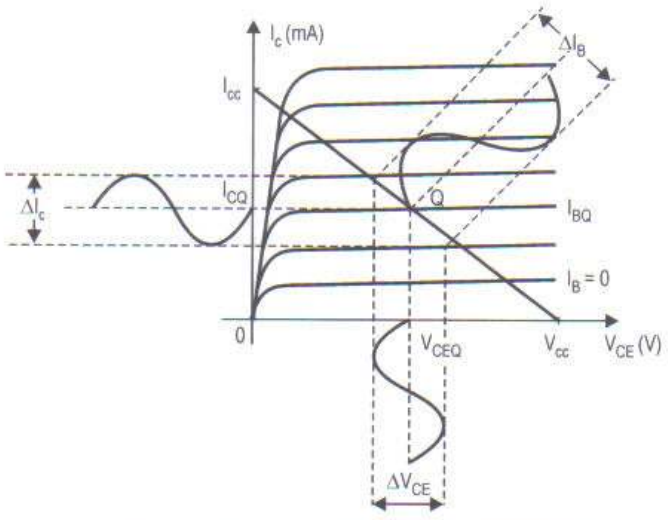


Figura 49.3 - Localização do ponto de trabalho na característica $I_c = f(V_{CE})$.

A reta de carga passa pelos pontos I_{cc} e V_{cc}, em que $I_{cc} = \frac{V_{cc}}{(R_c + R_E)}$, pois nesse tipo de polarização, na malha de saída encontramos, além de R_c, o resistor R_E. Como a escolha de ponto de operação (Q) é importante, pois sua má localização acarreta distorções do sinal de saída, devemos fazer com que a tensão V_{CEQ} seja, aproximadamente, a metade do valor de V_{cc}.

Nessa situação as variações do sinal de entrada provocam uma variação de V_{CE} de tal forma a ter um ciclo completo dentro da região ativa do transistor. Um outro fato a ser observado é que o sinal de entrada não pode exceder certos limites em nível de amplitude, pois ultrapassaria a região ativa, distorcendo o sinal na saída, por isso esse circuito é denominado amplificador de pequenos sinais.

Além do problema da distorção, o amplificador possui resposta em frequência, ou seja, conforme muda a frequência, varia o seu ganho. Um amplificador ideal é aquele que tem o mesmo ganho para qualquer frequência, ou seja, possui **resposta plana**.

Na prática, normalmente os amplificadores apresentam resposta plana somente numa determinada faixa de frequência. A Figura 49.4 mostra a curva de resposta A = f(f) de um amplificador.

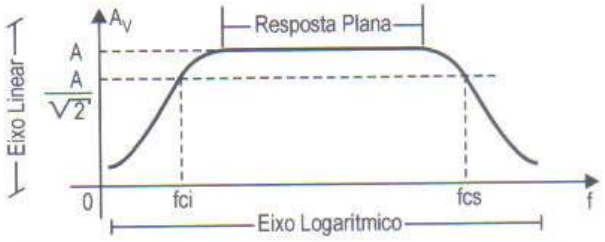


Figura 49.4 - Curva de resposta de um amplificador.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.
- Transistor: BC548 ou equivalente.
- Resistor: 100Ω, 330Ω, 1,2KΩ e 5,6KΩ.
- Capacitores: 100μF/10V e 1μF (dois).

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 49.5.

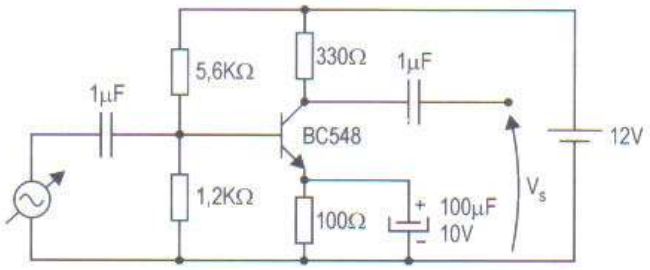


Figura 49.5

2) Ajuste a tensão do gerador de sinais para 100mV_{pp}, onda senoidal. Varie a frequência de acordo com o Quadro 49.1, meça e anote cada caso V_{spp}.

f(KHz)	1	2	4	6	8	10	20	30	40	50
V_{spp}										
A_v										

Quadro 49.1

3) Retire do circuito o capacitor de emissor (C_E). Ajuste a tensão do gerador de sinais para 100 mV_{pp}, onda senoidal e frequência 1KHz. Meça e anote no Quadro 49.2 as tensões V_{Epp} e V_{spp}.

V_{Epp}	
V_{spp}	
A_v	

Quadro 49.2

Exercícios

1) Calcule os ganhos em tensão para o circuito da Figura 49.5, preenchendo o Quadro 49.1.

2) Com os valores obtidos na questão anterior construa a curva de resposta do amplificador A = f(f). Utilize papel monolog.

3) Determine na curva a região em que a resposta é plana.

4) Com os dados do Quadro 49.2 calcule o ganho em tensão. Anote o resultado no mesmo quadro.

5) Compare o ganho obtido na questão anterior com o obtido na questão 1 para a mesma frequência. Explique a diferença.

EXPERIÊNCIA

50

Conexão Darlington

Objetivo

- Verificar, experimentalmente, o ganho em corrente de uma conexão Darlington.

Teoria

Em determinadas aplicações, o ganho em corrente dado por um único transistor pode ser insuficiente. Para solucionar o problema, utilizamos a **conexão Darlington**, que consiste na ligação de dois transistores, conforme mostra a Figura 50.1.

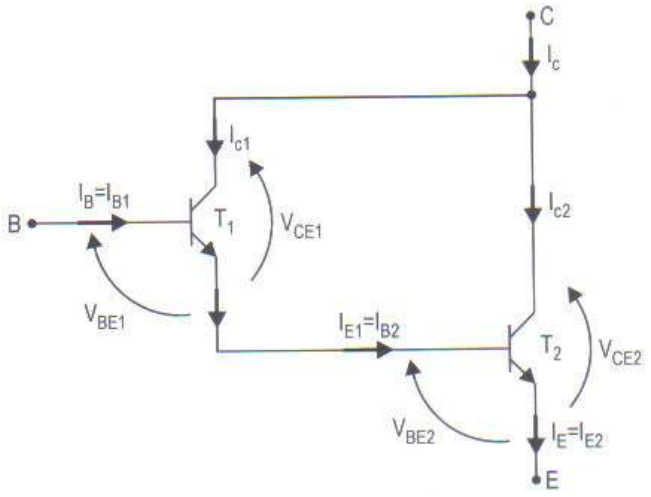


Figura 50.1 - Conexão Darlington.

A partir do circuito da figura podemos escrever:

$$I_c = I_{c1} + I_{c2}$$

sendo:

$$I_{c1} = \beta_1 \cdot I_{B1} \text{ e } I_{c2} = \beta_2 \cdot I_{B2}$$

substituindo: $I_c = \beta_1 \cdot I_{B1} + \beta_2 \cdot I_{B2}$

como: $I_{B2} = I_{E1} = I_{B1} + I_{c1} = I_B + I_{c1}$, pois $I_{B1} = I_B$

Podemos escrever:

$$I_c = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 (I_B + I_{c1})$$

substituindo I_{c1}, temos: $I_c = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 (I_B + \beta_1 \cdot I_B)$ ou $I_c = \beta_1 \cdot I_B + \beta_2 \cdot I_B + \beta_1 \beta_2 \cdot I_B$

evidenciando I_B, temos: $I_c = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_2) I_B$

como $\beta = \frac{I_c}{I_B}$, obtemos: $\beta = \frac{I_c}{I_B} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_2$

Portanto, ao conectarmos dois transistores desta forma, o ganho em corrente, dado por $\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_2$, resulta, conforme mostra a relação, em um valor aproximadamente igual ao produto dos ganhos em corrente parciais dos transistores envolvidos.

O conjunto que forma a conexão Darlington pode ser considerado um único transistor, possuindo os seguintes parâmetros:

$$V_{BE} = V_{BE1} + V_{BE2}$$

$$V_{CE} = V_{CE2}$$

A partir destes parâmetros podemos escrever as limitações da conexão:

$V_{CE\ máx} = V_{CE\ máx2}$ (não pode ultrapassar $V_{CE\ máx1} + V_{BE2}$)

$I_{c\ máx} = I_{c\ máx2}$ (pois, $I_{c\ máx2} >> I_{c1\ máx}$)

$P_{c\ máx} = P_{c\ máx2} = V_{CE2} \cdot I_{c2}$

A partir dessas limitações concluímos que o transistor T_1 pode ser de potência inferior à do transistor T_2.

Na prática, encontramos a conexão Darlington já pronta em um encapsulamento idêntico ao de um transistor de potência.

Para exemplificar, vamos constituir uma conexão Darligton com um transistor de baixa potência e um outro de média potência, conforme a Figura 50.2.

Transistor	Polarização	$V_{CEO\ máx}$ (V)	$I_{c\ máx}$ (A)	$P_{c\ máx}$ (W)	h_{fe}	Disposição dos terminais
BC548	NPN	30	0,1	0,5	110 - 800	
BD135	NPN	45	1	8	40 - 250	

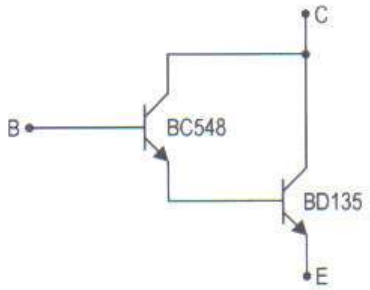


Figura 50.2 - Transistores BC548 e BD135 formando a conexão Darligton.

A partir das limitações dos transistores determinamos as da conexão Darligton.

$$V_{CE\ máx} = 30{,}7 \text{ (pois, embora } V_{CE\ máx2} = 45V,\ V_{CE\ máx1} = 30V\text{)}.$$

$$I_{c\ máx} = 1A$$

$$P_{c\ máx2} = 8W$$

O ganho em corrente do dispositivo será:

$$\beta = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \cdot \beta_2$$

$$\beta = 100 + 40 + 110 \cdot 40$$

$$\beta = 4550$$

Para fins de segurança, no cálculo do β da conexão Darligton, utilizamos os valores mínimos das faixas fornecidas pelo fabricante.

Material Experimental

- Fonte variável.
- Transistores: BC548 e BD135 ou equivalente.
- Resistores: 100Ω e 4,7KΩ.
- Potenciômetro: 1KΩ (LIN).
- Capacitor: 1μF.

- Miliamperímetro: 0-100mA.
- Multímetro.
- Gerador de sinais.
- Osciloscópio.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 50.3.

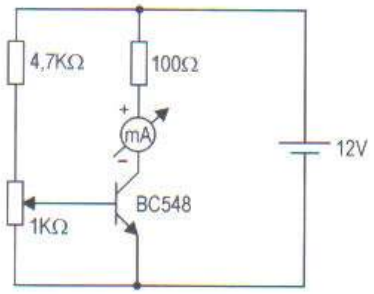


Figura 50.3

2) Por meio do potenciômetro de 1KΩ ajuste a corrente de coletor para 90mA. Meça a corrente de base e anote seu valor no Quadro 50.1.

3) Substitua o transistor BC548 pelo BD135 e repita o item 2.

4) Monte o circuito da Figura 50.4 e repita o item 2.

Transistor	I_c(mA)	I_B	$\beta = I_c / I_B$
BC548	90		
BD135	90		
Darligton	90		

Quadro 50.1

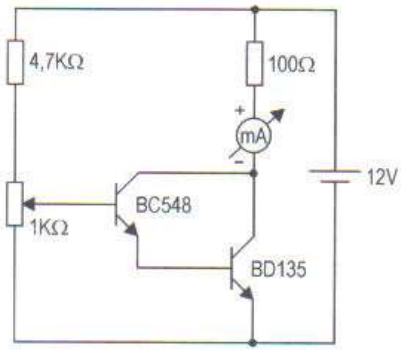


Figura 50.4

5) Conecte ao circuito um capacitor, conforme mostra a Figura 50.5.

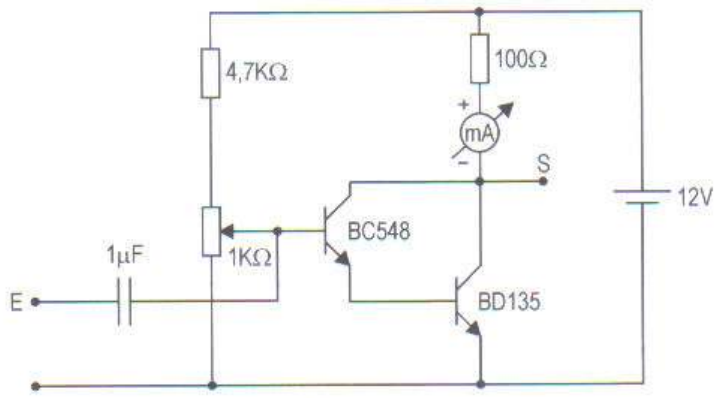


Figura 50.5

6) Por meio do potenciômetro de 1KΩ ajuste a corrente de coletor em 50mA. Aplique à entrada (E) um sinal senoidal de 1KHz proveniente de um gerador de sinais, ajustando sua amplitude de maneira a ter na saída (s) um sinal sem distorção visível, observando por meio de um osciloscópio. Meça V_{Epp} e V_{spp}, anotando seus valores, bem como suas formas de onda no Quadro 50.2.

	V_{Epp}	V_{spp}
Formas de onda		

Quadro 50.2

Exercícios

1) Utilizando os valores do Quadro 50.1, calcule o β, anotando os resultados no mesmo quadro.

2) Com os valores de β obtidos para os transistores BC548 e BD135, calcule o β da conexão Darligton. Compare esse valor com o mesmo obtido experimentalmente.

3) Utilizando os valores do Quadro 50.2, calcule o ganho em tensão (A_v).

Anotações

EXPERIÊNCIA

51

Fonte de Tensão Estabilizada

Objetivos

- Verificar, experimentalmente, o funcionamento de uma fonte de tensão estabilizada.
- Levantar a característica de regulação $V_s = f(I_s)$.

Teoria

A partir de um circuito, com diodo Zener, podemos construir uma fonte de tensão estabilizada que, associada a um transistor, pode operar em uma faixa de corrente de maiores proporções, pois o transistor funciona como amplificador da corrente de saída, sem a sobrecarga do diodo Zener. Esse circuito encontra-se na Figura 51.1.

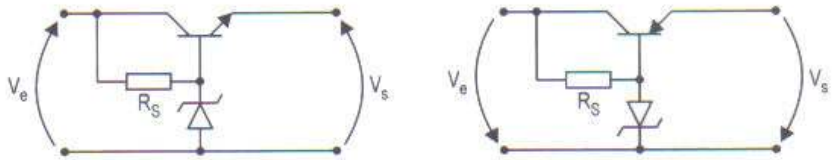


Figura 51.1 - Fonte de tensão estabilizada: (a) utilizando TR. NPN; (b) utilizando TR. PNP.

A tensão de entrada (V_e) desse circuito pode ser proveniente de um estágio retificador filtrado ou de uma fonte de tensão contínua, a qual se deseja estabilizar, podendo fixar seu valor em um outro menor. Para a devida análise, vamos utilizar a configuração NPN, colocando todas as tensões e correntes no circuito, conforme mostra a Figura 51.2.

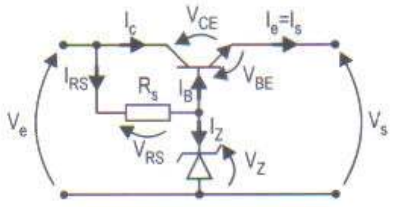


Figura 51.2 - Fonte de tensão estabilizada na configuração NPN.

O seu princípio de funcionamento baseia-se na estabilidade dos parâmetros V_Z e V_{BE} que associados na malha de saída possibilitam que a tensão de saída (V_s) tenha um valor constante, definido por $V_s = V_Z - V_{BE}$. As variações da tensão de entrada provocam a variação da tensão V_{CE}, não aparecendo na saída, pois $V_e = V_{CE} + V_s$, sendo V_s um valor constante.

Da mesma forma, as variações da tensão de entrada provocam a variação da tensão V_{Rs} e, consequentemente, da corrente I_{Rs}, que provoca a variação da corrente I_Z, pois $I_{Rs} = I_B + I_Z$, sendo I_B constante para um determinado valor ôhmico da carga ligada à saída.

Caso se altere o valor da carga, com consequente alteração de I_B, mantendo V_e constante, a compensação é feita por I_Z da mesma forma, assegurando a estabilidade do circuito.

As variações de V_e estão limitadas pelos parâmetros $I_{Z\ mín}$ e $I_{Z\ máx}$ do diodo Zener, e também pelos V_{CEsat} e $V_{CEmáx}$ do transistor dentro de faixas especificadas no dimensionamento do projeto.

Vamos escrever as equações do circuito, considerando essas limitações, para uma determinada carga:

1) Análise pelo diodo Zener

$$V_{e\ mín} = R_s\,(I_B + I_{Z\ min}) + V_Z$$

$$V_{e\ máx} = R_s\,(I_B + I_{Z\ máx}) + V_Z$$

2) Análise pelo transistor

$$V_{e\ mín} = V_{CE\ sat} + V_s$$

$$V_{e\ máx} = V_{CE\ máx} + V_s$$

As situações críticas do circuito ocorrem, para o diodo Zener, quando a fonte estiver em vazio, pois nesse caso $I_B = 0$ e toda corrente I_{Rs} circula pelo diodo Zener. Para maior segurança, deve estar prevista no dimensionamento de R_s esta situação, considerando a máxima variação da tensão de entrada.

Para o transistor, a situação crítica ocorre quando for conectada à saída do circuito uma carga de baixo valor ôhmico, observando que, com o aumento da corrente de saída, a corrente de coletor não deve ultrapassar $I_{c\ máx}$ e juntamente com V_{CE}, limitada por $V_{CE\ máx}$, não sobrecarregar a potência de coletor, pois $P_c = V_{CE} \cdot I_c$, sendo P_c limitada por $P_{c\ máx}$.

Considerando essas limitações, para fins de projeto, podemos obter as relações para o cálculo de R_s, devendo localizar-se entre $R_{s\,mín}$ e $R_{s\,máx}$.

$$R_{s\,mín} = \frac{V_{e\,máx} - V_Z}{I_{Z\,máx}}$$

$$R_{s\,máx} = \frac{V_{e\,mín} - V_Z}{I_{Z\,mín}}$$

Para maior eficiência do circuito, ampliando a faixa de corrente de saída, devemos escolher um valor de R_s próximo a $R_{s\,mín}$.

Para exemplificar, vamos projetar uma fonte de tensão estabilizada de 12V/1A.

1) Desenho do circuito

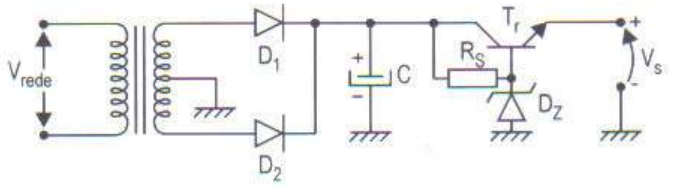


Figura 51.3 - Circuito completo de uma fonte de tensão estabilizada.

2) Dimensionamento do estágio retificador

- Transformador: 110V/12 + 12V/1A
- Diodos: 1N 4004
- Capacitor: 2200 μF/25V

Utilizando o retificador com os componentes anteriormente especificados, teremos na saída e entrada do estágio estabilizador uma tensão V_e = 17V. Adotamos para o projeto uma variação desta de ±10%.

3) Escolha do transistor e do diodo Zener

Transistor: BD235	NPN
	V_{CEO} = 60V
	$I_{c\,máx}$ = 2A
	$P_{c\,máx}$ = 25W
Diodo Zener:	13V/1,3W

O transistor foi escolhido na tabela fornecida pelo fabricante para trabalhar dentro das características da fonte, com uma margem de segurança, sem sobrecarga. O diodo

escolhido possui tensão nominal igual a 13V, pois V_s = 13 - 0,7 = 12,3V, valor próximo ao predeterminado.

4) Cálculo de $I_{Z\,máx}$ e $I_{Z\,mín}$

$$I_{Z\,máx} = \frac{P_{Z\,máx}}{V_Z} = \frac{1,3}{13} = 100\,mA$$

$$I_{Z\,mín} = \frac{I_{Z\,máx}}{10} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{10} = 10\,mA$$

5) Cálculo de R_s

$$R_{s\,mín} = \frac{V_{e\,máx} - V_Z}{I_{Z\,máx}} = \frac{18,7 - 13}{100 \cdot 10^{-3}} = 57\Omega$$

$$R_{s\,máx} = \frac{V_{e\,mín} - V_Z}{I_{Z\,mín}} = \frac{15,3 - 13}{100 \cdot 10^{-3}} = 230\Omega$$

$$R_{s\,adotado} = 68\Omega$$

$$P_{Rs} = R_s \cdot (I_{Z\,máx})^2 = 68 \cdot (100 \cdot 10^{-3})^2 = 0,68W$$

$$\therefore \quad R_s = 68\Omega / 1,15W$$

6) Cálculo de $R_{L\,mín}$

$$R_{L\,mín} = \frac{V_s}{I_{s\,máx}} = \frac{12,3}{1} = 12,3\Omega$$

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 100Ω, 150Ω, 220Ω, 270Ω, 470Ω, 680Ω e 1KΩ.
- Transistor: BC548 (ou equivalente).
- Diodo Zener: 5,6V/0,4W.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 51.4.

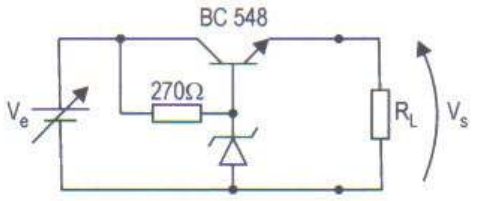


Figura 51.4

2) Ajuste V_e para 10V. Para cada valor de R_L do Quadro 51.1, meça e anote as tensões V_{BE}, V_{CE}, V_Z e V_s, e a corrente I_s.

***Observação**: Para $R_L = \infty$ a corrente I_s será obviamente igual a zero, não sendo possível medi-la.*

R_L (Ω)	∞	1000	680	470	220	150	100
V_{BE} (V)							
V_{CE} (V)							
V_Z (V)							
V_s (V)							
I_s (mA)							

Quadro 51.1

3) Repita o item 2 para V_e = 9V e V_e = 11V. Anote os resultados, respectivamente, nos Quadros 51.2 e 51.3.

R_L (Ω)	∞	1000	680	470	220	150	100
V_{BE} (V)							
V_{CE} (V)							
V_Z (V)							
V_s (V)							
I_s (mA)							

Quadro 51.2

R_L (Ω)	∞	1000	680	470	220	150	100
V_{BE} (V)							
V_{CE} (V)							
V_Z (V)							
V_s (V)							
I_s (mA)							

Quadro 51.3

Exercícios

1) Para os quadros, construa as curvas de $V_s = f(I_s)$.

2) Projete uma fonte de tensão estabilizada de 9V/500mA, utilizando os dados seguintes:

Transistor: $V_{BE} = 0,7V$

$V_{CE\ máx} = 30V$

$P_{c\ máx} = 8W$

$I_{c\ máx} = 1,0\ A$

Diodo Zener: 10V/1W

Tensão de entrada: 15V ± 10%

EXPERIÊNCIA

52

Fonte de Corrente Estabilizada

Objetivos

- Verificar, experimentalmente, o funcionamento de uma fonte de corrente estabilizada.
- Levantar a característica de regulação $I_s = f(V_s)$.

Teoria

A fonte de corrente estabilizada consiste em um circuito formado com diodo Zener, transistor e resistores limitadores. Mediante esses componentes, a fonte mantém constante na saída um valor de corrente, especificado previamente no projeto, em função de uma faixa de valores de tensão exigida pela carga. Esse circuito é visto na Figura 52.1.

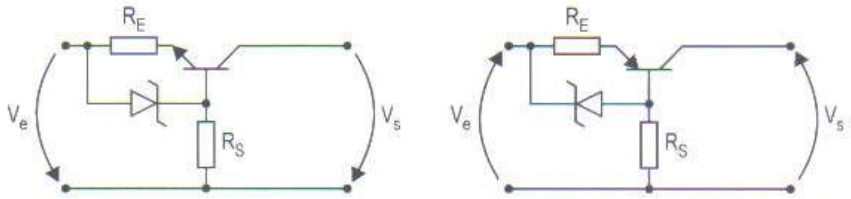


Figura 52.1 - Fonte de tensão estabilizada: (a) utilizando TR. NPN; (b) utilizando TR. PNP.

A tensão de entrada (V_e) desse circuito pode ser proveniente de um estágio retificador filtrado, ou de uma fonte de tensão contínua cuja corrente de saída deseja-se manter fixa em um determinado valor. Para a devida análise, vamos utilizar a configuração NPN, colocando todas as tensões e correntes no circuito, conforme mostra a Figura 52.2.

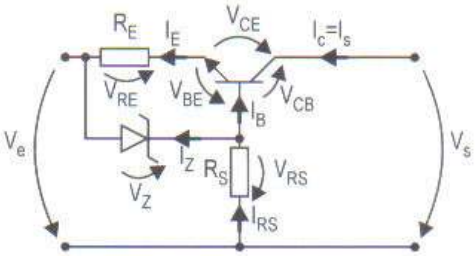


Figura 52.2 - Fonte de corrente estabilizada na configuração NPN.

O seu princípio de funcionamento baseia-se na estabilização da tensão no resistor de emissor (V_{RE}), em que $V_{RE} = V_Z - V_{BE}$ e, consequentemente, da corrente de emissor (I_E), pois sendo V_{RE} constante, a corrente I_E terá um valor fixo ($I_E = V_{RE}/R_E$). Como $I_c = \alpha I_E$, I_c também será um valor fixo que percorre a carga R_L, provocando uma queda de tensão cujo valor depende desta.

As variações da tensão de entrada provocam a variação da tensão VR_s e, consequentemente, da corrente IR_s, que provoca a variação da corrente I_Z, pois $IR_s = I_Z + I_B$, sendo I_B constante. Caso se altere o valor ôhmico da carga, a tensão V_{CE} realiza a compensação, pois V_s neste caso vai variar, sendo $V_e = V_{RE} + V_{CE} + V_s$.

De forma idêntica V_{CE} realiza a compensação para as variações de V_e. Os parâmetros V_{CEsat} e $V_{CE\ máx}$ do transistor, dentro de faixas especificadas no dimensionamento do projeto, limitam as variações de V_e e de V_s, enquanto os parâmetros $I_{Z\ mín}$ e $I_{Z\ máx}$ do diodo Zener limitam apenas as variações de V_e.

Assim sendo, podemos escrever as equações do circuito, considerando essas limitações, para uma determinada carga.

1) Análise pelo diodo Zener

$$V_{e\ mín} = R_s (I_B + I_{Z\ mín}) + V_Z$$

$$V_{e\ máx} = R_s (I_B + I_{Z\ máx}) + V_Z$$

2) Análise pelo transistor

$$V_{e\ min} = V_{RE} + V_{CE\,sat} + V_s$$

$$V_{e\ máx} = V_{RE} + V_{CE\ máx} + V_s$$

No projeto, o transistor deve ser limitado para que sua potência de coletor não ultrapasse $P_{c\ máx}$, observando que $P_c = V_{CE} \cdot I_c$, estando V_{CE} e I_c dentro dos limites máximos.

Para o devido dimensionamento, devemos calcular R_E e R_s conforme as relações:

$$R_E = \frac{V_Z - V_{BE}}{I_E}$$

$$R_{s\ mín} = \frac{V_{e\ máx} - V_Z}{I_{Z\ máx} + I_B}$$

$$R_{s\ máx} = \frac{V_{e\ mín} - V_Z}{I_{Z\ mín} + I_B}$$

O valor de R_s adotado deve estar entre $R_{s\ min}$ e $R_{s\ máx}$ calculados.

Para exemplificar, vamos projetar uma fonte de corrente estabilizada para I_s = 20mA, sendo alimentada por uma tensão $V_e = 20V \pm 10\%$.

1) Desenho do circuito

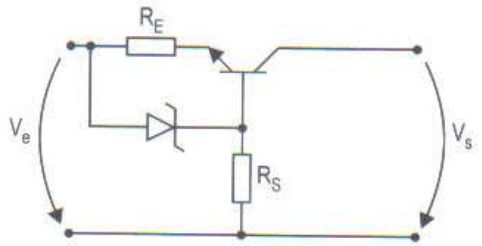


Figura 52.3 - Circuito de uma fonte de corrente estabilizada.

2) Escolha do transistor e do diodo Zener

Transistor: BC548 $V_{CE\ máx} = 30V$

$\beta_{mín} = 110$

$P_{c\ máx} = 0,5W$

$I_{c\ máx} = 100mA$

Diodo Zener: 8,2V/1W

O transistor atende às especificações, pois na pior situação possível, ou seja, saída da fonte em curto, sua potência dissipada no coletor será:

$$P_c = V_{CE} \cdot I_c$$

sendo: $V_{CE} = V_{e\,máx} - V_{RE}$

$$V_{CE} = 22 - (8,2 - 0,7)$$

$$V_{CE} = 14,5V$$

$$P_c = 14,5 \cdot 20 \cdot 10^{-3}$$

$$P_c = 0,29W$$

3) Cálculo de R_E

$$R_E = \frac{V_Z - V_{BE}}{I_E}$$

em que $I_E = I_s$

$$\therefore \quad R_E = \frac{8,2 - 0,7}{20 \cdot 10^{-3}} = 375\Omega$$

Como a adoção do valor de R_E implica na imprecisão do valor da corrente de saída, vamos utilizar como R_E um resistor de 330Ω em série com um trimpot de 100Ω, o qual deve ser ajustado para obter o valor da corrente de saída.

4) Cálculo de $I_{Z\,máx}$ e $I_{Z\,mín}$

$$I_{Z máx} = \frac{P_{Z máx}}{V_Z} = \frac{1}{8,2} = 122\text{mA}$$

$$I_{Z mín} = \frac{I_{Z máx}}{10} = \frac{122 \cdot 10^{-3}}{10} = 12,2\text{mA}$$

5) Cálculo de R_s

$$R_{s mín} = \frac{V_{e máx} - V_Z}{I_{Z máx} + I_B}$$

em que: $I_B = \frac{I_s}{\beta} = \frac{20 \cdot 10^{-3}}{110} = 181,8\mu\text{A}$

$$R_{s mín} = \frac{22 - 8,2}{122 \cdot 10^{-3} + 181,8 \cdot 10^{-6}} = 112,9\Omega$$

$$R_{s máx} = \frac{V_{e mín} - V_Z}{I_{Z mín} + I_B}$$

$$R_{s máx} = \frac{18 - 8,2}{12,2 \cdot 10^{-3} + 181,8 \cdot 10^{-6}} = 791,5\Omega$$

$$R_{s\ adotado} = 470\Omega$$

Material Experimental

- Fonte variável.
- Resistores: 330Ω e 560Ω.
- Transistor: BC548 (ou equivalente).
- Diodo Zener: 8,2V/1W.
- Potenciômetro: 470Ω (LIN).
- Miliamperímetro: 0-100mA.
- Multímetro.

Parte Prática

1) Monte o circuito da Figura 52.4.

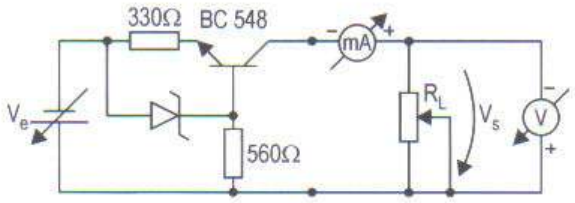


Figura 52.4

2) Ajuste V_e para 20V. Por intermédio do potenciômetro ajuste V_s, conforme Quadro 52.1. Para cada caso, meça e anote as tensões V_{BE}, V_{CE}, V_Z e a corrente I_s.

V_s (V)	0	2	4	6	8
V_{BE} (V)					
V_{CE} (V)					
V_Z (V)					
I_s (mA)					

Quadro 52.1

3) Repita o item 2 para V_e = 18V e V_e = 22V. Anote os resultados, respectivamente, nos Quadros 52.2 e 52.3.

V_s (V)	0	2	4	6	8
V_{BE} (V)					
V_{CE} (V)					
V_Z (V)					
I_s (mA)					

Quadro 52.2

V_s (V)	0	2	4	6	8
V_{BE} (V)					
V_{CE} (V)					
V_Z (V)					
I_s (mA)					

Quadro 52.3

1) Para os quadros, construa as curvas $I_s = f(V_s)$.

2) Projete uma fonte de corrente estabilizada de 200mA, utilizando os dados seguintes:

Transistor: $V_{BE} = 0,7V$

$V_{CE\ máx} = 45V$

$P_{c\ máx} = 8W$

$I_{c\ máx} = 1A$

$\beta = 40$

Diodo Zener: 4,7V/1W

Tensão de entrada: $10V \pm 10\%$

3) Para a fonte da equação anterior, calcule $R_{L\ máx}$.

Bibliografia

CAPUANO, F. G.; IDOETA, I. V. **Elementos de Eletrônica Digital**. São Paulo: Érica, 1984.

CUTLER, P. **AC Circuit Analysis**. McGraw-Hill, 1974.

_____. **DC Circuit Analysis**. McGraw-Hill, 1968.

DEBOO, G; BURROUS, C. **Circuitos Integrados Y Dispositivos Semiconductores**. Marcombo, 1977.

GONÇALVES, D. **Física: Eletricidade, Eletromagnetismo, Corrente Alternada**. Livro Técnico, 1978.

IBRAPE, C. **Catálogos de Componentes**, 1987.

KASSATKIN, A. S. **Fundamentos da Electrotecnia**. Mir Moscovo, 1980.

MALVINO, A. P. **Eletrônica.** Vol. 1. McGraw-Hill, 1986.

MELLO, H. A.; INTRATOR, E. **Dispositivos Semicondutores**. LCTE, 1980.

MOTOROLA. **Semicondutor Data Library**, 1974.

SANDRINI, W. J.; CIPELLI, A. M. V. **Teoria e Desenvolvimento de Projetos de Circuitos Eletrônicos**. São Paulo: Érica, 1987.

VASSALO, F. R. **Manual de Instrumentos de Medida Electrónicos**. CEAC, 1981.

_____. **Manual Del Osciloscópio**. CEAC, 1977.

ZBAR, P. B.; SHILDKRANT, S. **Practicas de Elitricidad**. Marcombo, 1966.

LABORATÓRIO
DE ELETRICIDADE E ELETRÔNICA

Este livro aborda as principais teorias, experiências e projetos necessários para o aprendizado de Eletricidade e Eletrônica Básica.

Apresenta uma sequência evolutiva de experiências de Eletricidade e Eletrônica utilizando equipamentos e componentes facilmente encontrados, auxiliando a aprendizagem com o desenvolvimento prático dos assuntos abordados.

Mostra a utilização de equipamentos indispensáveis às atividades práticas referentes à área, tais como multímetro, osciloscópio e gerador de funções.

Todas as experiências apresentam exemplos resolvidos e exercícios propostos, essenciais para a complementação dos conhecimentos, proporcionando melhor assimilação conceitual.

Nas experiências pertinentes ao campo da Eletrônica, o livro possibilita o entendimento e o desenvolvimento de circuitos de grande aplicabilidade prática, tais como amplificadores de pequenos sinais e fontes estabilizadas de tensão e corrente.

Os sites ou e-mails eventualmente mencionados neste livro são ilustrativos, podendo ser modificados ou extintos a qualquer momento.

Código: 0169
ISBN: 978-85-7194-016-1

www.editoraerica.com.br